



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

ELASTICKÉ CHARAKTERISTIKY POVLAKŮ

ELASTIC CHARACTERISTICS OF COATINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomas Olivo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Libor Válka,
CSc.**

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Bc. Tomas Olivo**
Studijní program: Materiálové inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Libor Válka, CSc.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Elastické charakteristiky povlaků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stanovení elastických charakteristik materiálů povlaků, deponovaných na základním materiálu (substrátu), je v mnoha případech obtížné, zejména tehdy, jsou-li povlaky tvořené tenkými vrstvami a není tedy k dispozici dostatek materiálu pro zhotovení standardních zkušebních těles pro konvenční testy. Platí to i pro nástřiky provedené metodou studené kinetické depozice.

Jednou z možností, jak situaci řešit je využití nepřímých způsobů měření, např. vibrační metodu (impulse excitation technique, IET) či nanoindentaci a následně modelů elastického chování kompozitních materiálů pro výpočet požadovaných charakteristik.

Cíle diplomové práce:

- 1) Provést rozbor existujících modelů elastického chování kompozitních materiálů z pohledu existence limitů omezujících jejich platnost, primárně tloušťky vrstev kompozitu.
- 2) Stanovit elastické charakteristiky systému substrát–povlak pro několik tlouštěk vrstev, nanesených metodou studené kinetické depozice (cold–spray). Pro experimenty použít excitační (vibrační) metodu a nanoindentaci.
- 3) Posoudit vliv pórovitosti, popř. dalších nehomogenit struktury na platnost modelů elastického chování kompozitů a získané výsledky.

Seznam doporučené literatury:

ZGHEIB, E., A. ALHUSSEIN, M. F. SLIM, K. KHALIL and M. FRANCOIS. Multilayered models for determining the Young's modulus of thin films by means of Impulse Excitation Technique. *Mechanics of Materials*, 2019, 137. ISSN 01676636.

TOGNANA, S., W. SALGUEIRO, A. SOMOZA and A. MARZOCCA. Measurement of the Young's modulus in particulate epoxy composites using the impulse excitation technique. *Materials science & engineering A, Structural materials: properties, microstructure and processing*. Elsevier B.V, 2010, 527(18-19), 4619-4623. ISSN 0921-5093.

FARRISSEY, L.M. and P.E. MCHUGH. Determination of elastic and plastic material properties using indentation: Development of method and application to a thin surface coating. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 399(1-2), 254-266. ISSN 0921-5093.

BOURSIER NIUTTA, C., A. TRIDELLO, G. BELINGARDI and D. S. PAOLINO. Nondestructive determination of local material properties of laminated composites with the impulse excitation technique. *Composite Structures*, 2021, 262. ISSN 0263-8223.

VIGNOLI, L., L. MARCELO, A. SAVI, P. M. C. L. PACHECO and A. L. KALAMKAROV. Comparative analysis of micromechanical models for the elastic composite laminae. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174. ISSN 13598368.

PEREIRA, I. Overview on Determination of Elastic and Damping Properties of Different Materials using Impulse Excitation Technique. *U.Porto Journal of Engineering. Universidade do Porto*, 2017, 3(3), 35-41. ISSN 2183-6493.

SLIM, M. F., A. ALHUSSEIN, A. BILLARD, F. SANCHETTE and M. FRANCOIS. On the determination of Young's modulus of thin films with impulse excitation technique. *Journal of Materials Research*, 2017, 32(3), 497-511. ISSN 0884-2914.

WHITING, R., M.A. ANGADI and S. TRIPATHI. Evaluation of elastic moduli in thin-film/substrate systems by the two-layer vibrating reed method. *Materials Science and Engineering: B*, 1995, 30(1), 35-38. ISSN 09215107.

ALFANO, M. and L. PAGNOTTA. An Inverse Procedure for Determining the Material Constants of Isotropic Square Plates by Impulse Excitation of Vibration. *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications*, 2005, 3-4, 287-292. ISBN 9780878499878. ISSN 1660-9336.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje určování Youngova modulu pružnosti v tahu povlaků se zahrnutím vlivu porozity pomocí impulzní excitační metody (IEM). V teoretické části jsou rozebrány základy impulzní excitační metody a nanoindentace. Následně jsou uvedeny druhy kompozitních materiálů, na které navazuje popis Cold Spray technologie použité k výrobě povlaků uvedených v této práci. V další části jsou definovány kompozitní modely použité pro vyhodnocení naměřených dat. Experimentální část je věnována popisu přípravy zkušebních těles, tj. systému substrátu s povlakem spolu s průběhem nanoindentační a impulzní excitační zkoušky. Na základě těchto zkoušek byly pomocí čtyř kompozitních modelů vyhodnoceny moduly pružnosti v tahu nanosených povlaků, které byly srovnány s výsledky z nanoindentační zkoušky. Nejvhodnějším z uvedených modelů se ukázal být model založený na směšovacím pravidle se zahrnutím nelineárního vlivu porozity.

Klíčová slova

Youngův modul pružnosti, porozita, impulzní excitační metoda, cold spray, povlak

Abstract

The thesis focuses on the determination of Young's modulus of elasticity in tension of coatings with the inclusion of the effect of porosity using the impulse excitation method (IEM). In the theoretical part, the basics of the impulse excitation method and nanoindentation are discussed. Subsequently, the types of composite materials are presented, followed by a description of the Cold Spray technology used to produce the coatings presented in this work. In the next section, the composite models used to evaluate the measured data are defined. The experimental part is devoted to the description of the preparation of the test specimens, i.e., the substrate-coating system, together with the nanoindentation and pulsed excitation test procedure. Based on these tests, the tensile elastic moduli of the deposited coatings were evaluated using four composite models and compared with the results from the nanoindentation test. The most appropriate of these models was found to be the one based on the rule of mixtures with the inclusion of the nonlinear effect of porosity.

Keywords

Young's modulus, porosity, Impulse excitation technique, cold spray, coating

OLIVO, Tomas. *Elastické charakteristiky povlaků*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157408>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ing. Libor Válka, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Elastické charakteristiky povlaků** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

Tomas Olivo

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Liboru Válkovi, CSc. za cenné rady, vedení a trpělivost při zpracovávání této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval pracovníkům ÚMVI za asistenci při zpracování vzorků a za jejich rady a podněty. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za podporu během celého studia.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce	2
3	Teoretická část.....	3
3.1	Impulzní excitační metoda.....	3
3.2	Nanoindentace	7
3.3	Kompozitní materiály	11
3.4	Kompozitní modely	15
4	Experimentální část.....	21
4.1	Zvolené materiály	21
4.2	Příprava zkušebních těles.....	21
4.3	Impulzní excitační metoda.....	22
4.4	Nanoindentace	23
5	Výsledky	26
5.1	Zkouška tahem	26
5.2	Impulzní excitační metoda.....	26
5.3	Nanoindentace	31
5.4	Výpočty modulu pružnosti v tahu.....	32
5.4.1	Směšovací pravidlo.....	32
5.4.2	Analýza porozity.....	34
5.4.3	Směšovací pravidlo s vlivem porozity.....	35
5.4.4	Směšovací pravidlo se zahrnutím nelineárního vlivu porozity	36
5.4.5	Pautrotův model	37
5.4.6	Porovnání použitých modelů.....	39
6	Diskuse.....	42
7	Závěr.....	45
8	Literatura.....	46
9	Seznam použitých zkratk a symbolů	50
10	Seznam obrázků a tabulek	53

1 Úvod

Nástřiky zhotovené pomocí technologie studené kinetické depozice (Cold Spray) stále více nacházejí uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích jak při výrobě nových, tak opravách stávajících strojních komponent. Podstatou tohoto procesu je nanášení primárně kovových materiálů ve formě prášku (částic) vysokou rychlostí na substrát. Při dopadu se částice deformují a tvoří souvislý povlak, jehož tloušťku lze regulovat. Výsledné vlastnosti povlaku hrají důležitou roli ve spolehlivosti a životnosti dané součásti.

Stanovení mechanických vlastností nástřiků je zpravidla problematické. Obvykle je nemožné oddělit povlak od substrátu pro účely výroby zkušebních těles a vyhodnocení mechanických vlastností samotného nástřiku. Vhodnější je použití nedestruktivních nebo minimálně destruktivních zkušebních metod, založených na hodnocení systému substrát-povlak jako celku.

Jednou z těchto metod je impulzní excitační metoda (IEM), na kterou je tato práce zaměřena. Uvedená metoda je často využívána pro vyhodnocování elastických vlastností homogenních materiálů. Komplikace nastávají, když analyzovaný vzorek sestává ze dvou či více složek (vrstev). Problémem je často malá tloušťka jednotlivých vrstev v porovnání se substrátem, což má za následek značný vliv substrátu na výsledné vlastnosti. Z tohoto důvodu je kladen důraz na vývoj nedestruktivních metod a postupů, které by umožnily vyhodnocovat elastické vlastnosti i vícesložkových systémů.

Další metodou používanou pro vyhodnocení vlastností tenkých vrstev je nanoindentační zkouška. Její relativní nevýhodou je časová náročnost a velká citlivost měření na vlivy pocházející z okolního prostředí. Jedná se o destruktivní zkoušku (podobně jako v případě IEM), jelikož vlastní měření probíhá na zkušebních tělesech, odebraných a připravených z původního tělesa (konstrukce, polotovaru apod.). Metoda ovšem umožňuje objektivně posoudit elastické vlastnosti povlaků a je tak vhodným kandidátem pro porovnání a kontrolu výsledků získaných z výpočetních modelů, založených na impulzní excitační metodě.

Předložená práce je zaměřena na vyhodnocení elastických vlastností povlaků pomocí impulzní excitační metody. V teoretické části práce je popsána technologie použitá k přípravě povlaků a následně principy metod určování elastických charakteristik povlaků. Experimentální část se následně zabývá vyhodnocováním dat a určováním Youngova modulu pružnosti v tahu zhotovených povlaků pomocí impulzní excitační metody a navržených kompozitních modelů.

2 Cíle práce

1. Provést rozbor existujících modelů elastického chování kompozitních materiálů z pohledu existence limitů omezujících jejich platnost, primárně tloušťky vrstev kompozitu.
2. Stanovit elastické charakteristiky systému substrát-povlak pro několik tlouštěk vrstev, nanesených metodou studené kinetické depozice (Cold Spray). Pro experimenty použít excitační (vibrační) metodu a nanoindentaci.
3. Posoudit vliv pórovitosti, popř. dalších nehomogenit struktury na platnost modelů elastického chování kompozitů a získané výsledky.

3 Teoretická část

3.1 Impulzní excitační metoda

Impulzní excitační metoda, zkráceně IEM, představuje jednu z možných metod měření základních elastických charakteristik, tj. Youngův modul pružnosti v tahu a ve smyku, případně Poissonova poměru. Jednou z hlavních výhod této metody je její rychlost, jednoduchá reprodukovatelnost a relativně nízké náklady na měření. Avšak je důležité vzít v úvahu i některé nevýhody, např. citlivost na rušivé signály, vibrace, nebo problematické testování materiálů s nehomogenní strukturou či vysokou mírou porozity. Uvedené aspekty budou v rámci práce podrobně zkoumány a analyzovány. Principem metody je mechanicky generovaný excitační impuls, aplikovaný na zkoušený vzorek. Po impulzu se vzorek chová jako pružný systém, kterým prochází mechanické vibrace. Vibrace jsou registrovány mikrofonem a je provedena jejich časová analýza. Výsledky ve formě grafu dominantních frekvencí lze získat po zpracování signálu rychlou Fourierovou transformací (FFT).

Provedení této metody zahrnuje umístění vzorku na podpory tvořené vlákny, která jsou orientována s ohledem na vybraný vibrační režim a měřené parametry v souladu s normou ASTM E-1876. [1] Odpovídajícím způsobem uložený vzorek je následně mechanicky excitován buď automaticky nebo manuálně. [1]

Vzniklé vibrace jsou poté zachyceny akustickým mikrofonem. Lze použít i jiné metody detekce vibrací, jako jsou například metody laserové nebo magnetické. Důležité je zajistit, aby zvolená metoda byla schopna zachytit požadované frekvenční rozmezí. Ideální zařízení by mělo mít rozsah od 100 Hz do 50 kHz, přičemž vzorky z tvrdších materiálů vykazují vibrace na vyšších frekvencích.

Po zachycení těchto vibrací a jejich základním zpracování je aplikována rychlá Fourierova transformace, která převede frekvenční údaje do grafu znázorňujícího významnost jednotlivých frekvencí. Na základě tohoto grafu jsou určeny hlavní rezonanční frekvence, které jsou následně použity k výpočtu odpovídajících modulů pružnosti. [1]

Dalším krokem je výpočet koeficientu tlumení Q^{-1} podle vztahu

$$Q^{-1} = \frac{k}{\pi f_{RF}}, \quad (1)$$

kde k je ztrátový součinitel a f_{RF} je rezonanční frekvence. [2]

Pro ztrátový součinitel k platí

$$k = \frac{\delta}{2\pi}, \quad (2)$$

kde δ je logaritmický dekrement útlumu amplitud vibrací, určený ze záznamu zkoušky.

Vibrační módy

Existuje několik předem definovaných vibračních módů pro testování těles s jednoduchými geometrickými tvary (obdélníková, válcová a disková tělesa). Podpory jsou ve všech případech umístěny v uzlových bodech, detektor vibrací v místě kmiten.

Pro obdélníkové vzorky, které byly použity v experimentální části této práce, je modul pružnosti vypočítán podle vztahu

$$E = 0,9465 \cdot \left(\frac{m \cdot f_{\text{RF}}^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{L^3}{t^3} \right) \cdot T_1, \quad (3)$$

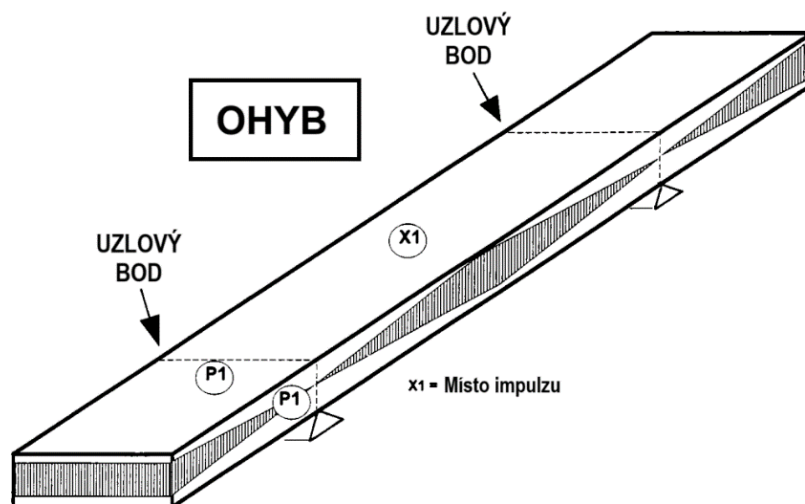
kde m je hmotnost vzorku, f_f rezonanční frekvence v ohybu, b šířka vzorku, L délka vzorku, t tloušťka vzorku a T_1 korekční faktor. Tento korekční faktor lze zjednodušeně vyjádřit jako

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752 \mu + 0,8109 \mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \left[\frac{8,34(1 + 0,2023 \mu + 2,173 \mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^4}{1 + 6,338(1 + 0,1408 \mu + 1,536 \mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2} \right]. \quad (4)$$

Jestliže platí, že $L/t \geq 20$, lze pro T_1 psát

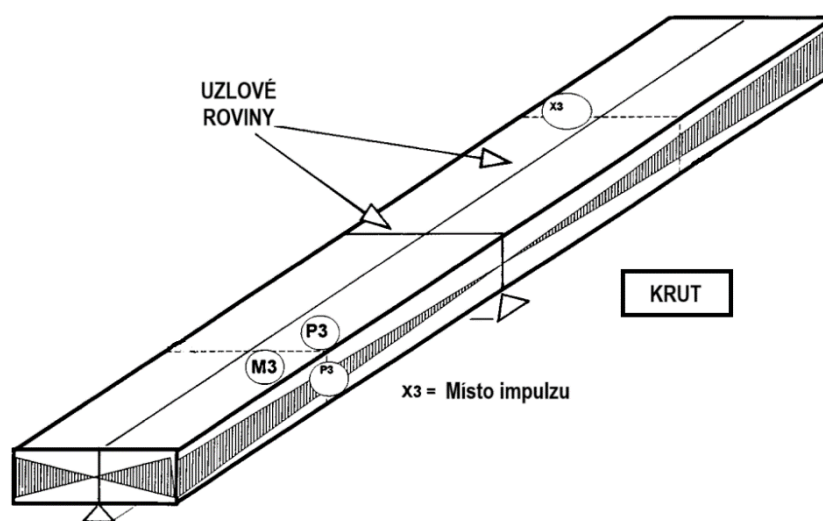
$$T_1 = \left[1 + 6,585 \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

V ohybovém vibračním módu je zkoušené těleso, v souladu s normou ASTM E-1876 [1], umístěno na podpory v uzlových bodech, které jsou vzdáleny $0,224 \times L$ od konců vzorku, jak je naznačeno na obr. 1. Těleso je poté excitováno na místě označeném jako XI . Měřicí software následně analyzuje rezonanční frekvence. Výsledná rezonanční frekvence f_f představuje průměrnou hodnotu rezonančních frekvencí z několika opakovaných měření. [1]



Obr. 1 – Schéma ohybového módu, upraveno z [1]

V případě torzního módu jsou podpory orientovány kolmo na sebe a protínají se uprostřed zkušební tělesa viz obr. 2.



Obr. 2 – Schéma torzního módu, upraveno z [1]

Modul pružnosti ve smyku je dán rovnicí

$$G = \frac{4Lm f_t^2}{bt} \left[\frac{B}{1 + A} \right], \quad (6)$$

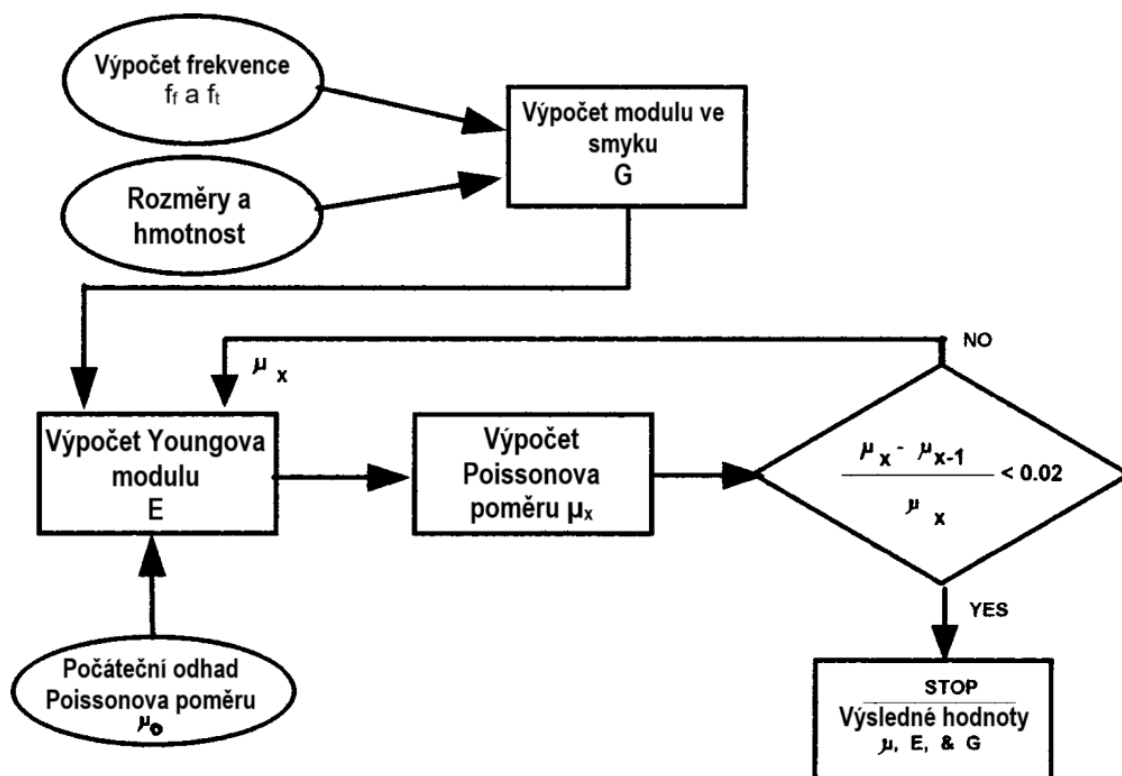
kde

$$B = \left[\frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \left(\frac{t}{b}\right) - 2,52 \left(\frac{t}{b}\right)^2 + 0,21 \left(\frac{t}{b}\right)^6} \right], \quad (7)$$

f_t je rezonanční frekvence a A je empiricky zjištěný korekční faktor závislý na poměru b/t . Tento faktor má dle [1] maximálně 2% vliv na výslednou hodnotu a může být tudíž vypuštěn.

Poissonův poměr

Výpočet Poissonova poměru pomocí IEM je prováděn nepřímo. Získává se korelací Youngova modulu v ohybu a ve smyku materiálu, nebo reciprokým iterativním postupem znázorněným na obr. 3.



Obr. 3 – Schéma iterativního výpočtu Poissonova poměru, upraveno z [1]

Nejprve se vypočte Youngův modul ve smyku a ohybu z rezonančních frekvencí f_t a f_f . Následně jsou tyto hodnoty dosazeny do rovnice pro výpočet Poissonova poměru pro izotropní nebo příčně izotropní materiál, viz rovnice (8) a (9). Tato hodnota je porovnána s předcházející hodnotou Poissonova poměru a pokud je rozdíl větší než 2 %, je nová hodnota brána jako vstupní parametr do dalšího výpočtu T_1 dle rovnice (4) a tím tedy Youngova modulu v ohybu. [1]

Pro Poissonův poměr v případě izotropního materiálu platí

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1, \quad (8)$$

v případě příčně izotropního materiálu potom

$$\mu_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1. \quad (9)$$

Přesnost umístění podpor má jen velmi malý vliv na hodnotu rezonančních frekvencí (f_f a f_i). Jejich umístění má však velký vliv na hodnotu tlumení (Q^{-1}). Pokud podpory nejsou umístěny přesně v uzlových polohách, dochází ke zvýšení hodnoty Q^{-1} v důsledku přídavného tlumení skrze podpory. [2]

Uvedené experimentální postupy lze provádět i za snížených či zvýšených teplot. [3, 4]

3.2 Nanoindentace

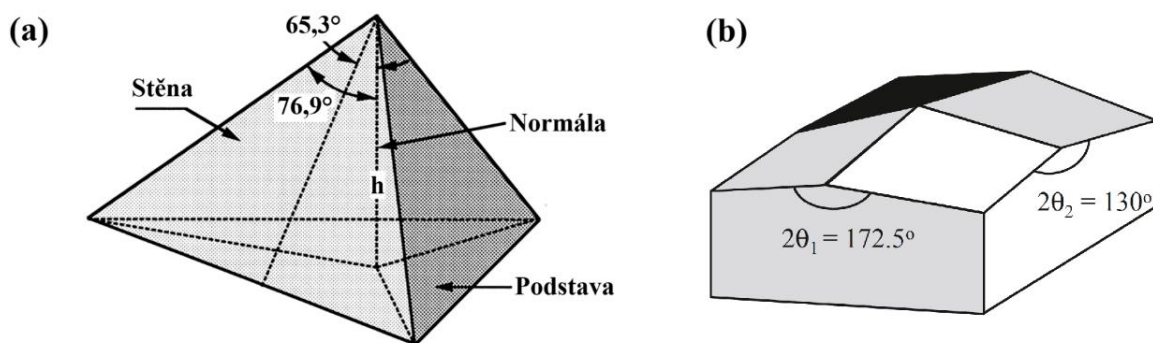
Nanoindentace je destruktivní metoda měření tvrdosti, založená na principu vtlačování indentoru do materiálu a následném vyhodnocení hloubky vpichu v závislosti na aplikovaném zatížení. Primárním výstupem je určení indentační tvrdosti a Youngova modulu pružnosti materiálu. [5]

Nanoindentace způsobuje velmi malé deformace v místě vpichu, což umožňuje zjistit reálné fyzikální vlastnosti nanosené vrstvy bez zahrnutí vlivu substrátu. Právě proto byla tato metoda zvolena k ověření výsledků výpočetních modelů využívaných v této práci.

Typy indentorů

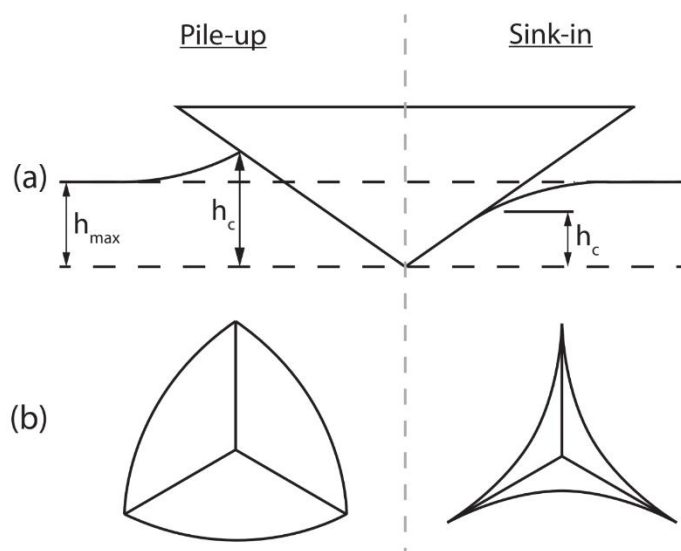
Berkovichův indentor, obr. 4a, má tvar jehlanu se třemi rovinnými stěnami a jedním vrcholem. Jeho výhodou je, že je, ve srovnání s Vickersovým indetorem díky své geometrii snáze vyrobitelný. [6] Úhel čela Berkovichova indentoru pro nanoindentační zkoušky, je $65,27^\circ$, což dává stejný poměr plochy vtisku k hloubce jako u Vickersova indentoru. Poloměr hrotu typického nového Berkovichova indentoru je řádově 50 až 100 nm. [6]

Knoopův indentor, obr. 4b, je čtyřstěnný indentor se dvěma různými čelními úhly. Měření rozdílných délek úhlopříček výsledného vtisku je velmi užitečné pro hodnocení anizotropie povrchu vzorku. Indentor byl původně vyvinut pro měření tvrdosti velmi tvrdých materiálů, kde díky delší úhlopříčce hrotu je možné snáze měřit rozměry i mělkých vtisků.



Obr. 4 – Schématické znázornění (a) Berkovichova a (b) Knoopova indentoru používaných pro nanoindentační zkoušky, upraveno z [5]

Při nanoindentační zkoušce se kontaktní plocha určuje pomocí měření hloubky vtisku v průběhu cyklu zatěžování a odlehčování. Údaje o tvrdosti lze získat bez zobrazování vtisku s vysokou přesností a reprodukovatelností. To je užitečné zejména pro malé vtisky, které jsou vyžadovány pro měření tvrdosti při velmi nízkých zatíženích. Zkouška má však velkou slabinu v důsledku "pile-up" a "sink-in" materiálu v okolí vtisku, což musí být při výpočtu kompenzováno. [6, 7]



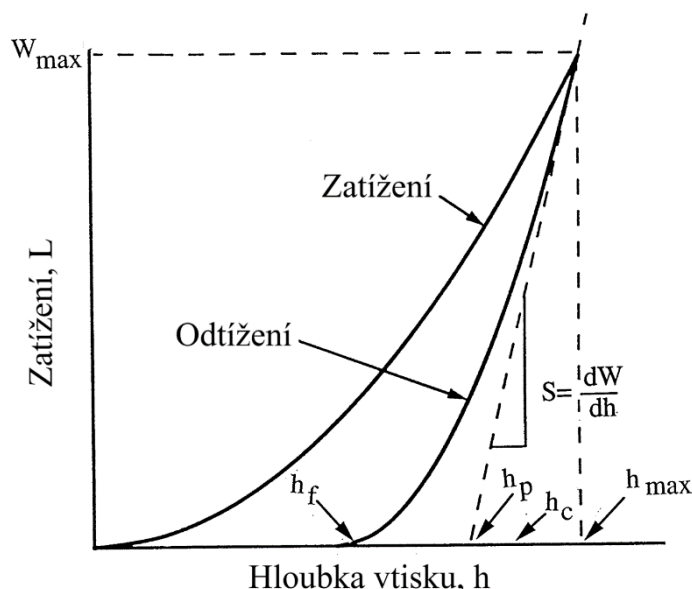
Obr. 5 – Schéma pile-upu (vlevo) a sink-inu (vpravo). (a) pohled v řezu vtisku, (b) pohled shora, převzato z [8]

Obvykle se při nanoindentaci používá Berkovichův hrot. Při zkoušce se provádí několik cyklů zatěžování a odlehčování, čímž získáme dostatečné množství dat pro spolehlivé vyhodnocení požadovaných veličin. [8]

Klasické měření se skládá z osmi kroků:

- Přiblížení se k povrchu
- Zatížení na nominální hodnotu zátěže, rychlostí 10% nominální zátěže za sekundu
- Odtížení 90% nominální zátěže, rychlostí 10% nominální zátěže za sekundu
- Opětovné zatížení na nominální zátěž

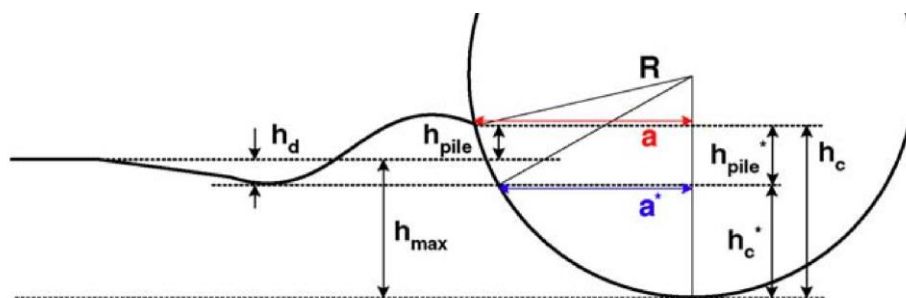
- Ustálení nominální zátěže po dobu 10 s
- Opětovné odtížení 90% nominální zátěže
- Ustálení po dobu 10 s po předchozím kroku
- Konečné kompletní odtížení



Obr. 6 – Schéma zatěžovací křivky při nanoindentaci, upraveno z [5]

Dokonale elastické těleso se deformuje podle Hookova zákona a po odtížení je tvar tělesa (vtisku) vrácen do původního stavu v důsledku navrácení elastické složky deformace. V teoretickém případě dokonale tuhého tělesa dochází při zatěžování pouze k plastické, tedy nevratné deformaci. To má za následek, že výsledný vtisk zůstane i po odtížení z geometrického hlediska nezměněn oproti stavu při maximálním zatížení v průběhu zkoušky.

Převážná většina materiálů se ale chová elasto-plasticky. V takovém případě dochází po odtížení k odstranění části deformace, která je způsobena její elastickou složkou. Schematicky je uvedená situace znázorněna na obr. 6, kde S je indentační tuhost získaná směrnicí při odtížení, h_p je indentační hloubka plastické části a h_f je finální hloubka vtisku po odtížení a kompletním odstranění elastické složky deformace. Kontaktní hloubka h_c je definována jako reálná kontaktní hloubka indentoru s materiálem v důsledku změny morfologie povrchu při maximálním zatížení. Jak je patrné z obr. 7, tato hloubka je o něco větší než hloubka maximální v důsledku nahromadění materiálu na okraji a elastické deformace, projevující se následným poklesem povrchu materiálu pod h_{max} (h_d). Zmíněné veličiny jsou potřebné pro určení reálné hloubky vtisku, a tedy pro získání přesné hodnoty tvrdosti. [8, 10]



Obr. 7 – Morfologie povrchu v okolí indentoru při maximálním zatížení, převzato z [9]

Na základě uvedených úvah byl vytvořen model [5] pro predikci kontaktní hloubky, vyjádřený rovnicí

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{W_{\max}}{S_{\max}}, \quad (10)$$

kde W_{\max} je maximální zatěžovací síla, S_{\max} je tuhost získaná z odtěžovací křivky a ε je konstanta vztažená ke geometrii indentoru, která je pro Berkovichův indenter rovna 0,72.

Výsledný vztah pro výpočet plochy vtisku je

$$A = 24,5 \cdot h_c^2. \quad (11)$$

Tvrdoost

Berkovichova indentační tvrdost je definována jako poměr maximálního zatížení ku ploše vtisku dle rovnice (12).

$$H_i = \frac{W_{\max}}{A}. \quad (12)$$

Youngův modul pružnosti

Abychom mohli vyhodnotit Youngův modul pružnosti materiálu, potřebujeme získat data o deformaci v závislosti na zatížení, přesněji směrnici této křivky. Jelikož během zatěžování dochází k elasto-plastické deformaci, je nutné provést tato vyhodnocení až při odtížení vzorku, kdy je možné zaznamenat rekuperaci elastické složky a pomocí sklonu S křivky vypočítat Youngův modul daného materiálu (viz obr. 6). [5]

Ze vztahu pro tuhost S byl odvozen vztah pro výpočet indentačního Youngova modulu

$$E_i = \frac{1\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}} \frac{dW}{dh}, \quad (13)$$

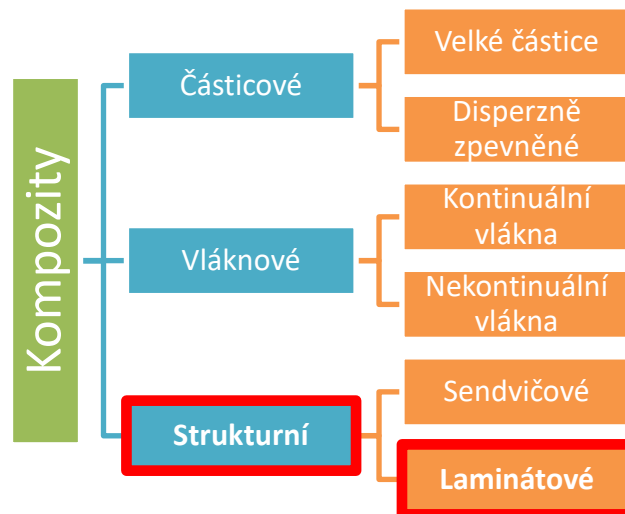
kde A je kontaktní plocha závislá na typu použitého indentoru. [5]

3.3 Kompozitní materiály

Strukturní nehomogenita a poměrně složitý mechanismus poškozování vede v případě kompozitů k mnohem náročnějšímu hodnocení a popisu jejich vlastností ve srovnání např. s kovy.

Za kompozitní materiál se považuje takový materiál, který se skládá ze dvou či více složek, kde tento systém tvoří z větší části matrice, která je zpevněna vyztužující složkou. V případě aplikací, kdy je potřeba vysoká pevnost při zachování nízké hmotnosti, matrici tvoří lehké materiály jako jsou hliník, titan nebo polymery. Ke zvýšení pevnosti se jako vyztužující složka používají například částice z karbidu křemíku, což vede ke vzniku částicových kompozitů. V případě využití vyztužující složky ve formě vláken či whiskerů nazýváme tyto kompozity vláknové.

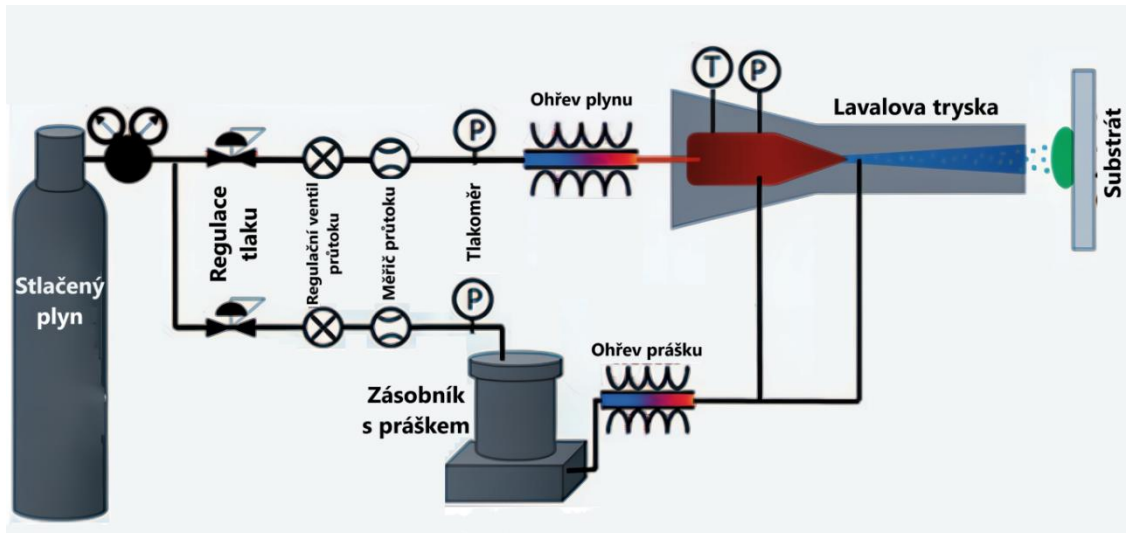
V této práci se budeme věnovat kompozitním materiálům vyrobených metodou Cold Spray spadajících do kategorie strukturních laminátových kompozitů. Výroba laminátových kompozitů spočívá ve spojení matrice s jednou či více vrstvami materiálu, nebo i deskami obsahujícími další složky. Všechny výše zmíněné typy kompozitů jsou uvedeny ve schématu na obr. 8.



Obr. 8 – Dělení kompozitních materiálů, upraveno z [9]

Cold Spray (studená kinetická depozice) je proces zpracování materiálu v pevné fázi, při kterém je substrát vystaven proudu malých částic urychlených na nadzvukovou rychlost. Částice prášku určené k vytvoření depozitu se vstříkují do proudu plynu, který tyto částice urychluje při expanzi v divergentní části Lavalovy dýzy. Teplota proudu plynu je vždy nižší než teplota tání výchozího materiálu, a jak plyn expanduje na nadzvukovou rychlost, klesá i jeho tlak a teplota. Po výstupu z trysky a po nárazu do substrátu se pevné částice plasticky deformují a vytvářejí kombinaci metalurgické a mechanické vazby s okolním materiálem. Výsledkem je vytvoření povlaku v pevné fázi. K depozici materiálu však dochází pouze pokud nárazová rychlost částic překročí definovanou prahovou hodnotu, tzv. kritickou rychlost V_c . [10]

Pro dosažení vyšších rychlostí proudění plynu v Lavalové dýze se stlačený plyn často přehřívá. Ačkoliv se používá přehřátý plyn o teplotě až 1000 °C (nebo i vyšší), skutečnost, že doba kontaktu částic nástřiku s horkým plynem je poměrně krátká a že plyn se při rozpínání v divergentní části trysky rychle ochlazuje, způsobuje, že teplota částic ve skutečnosti zůstává podstatně nižší než počáteční teplota přehřátého plynu, a tedy nižší než teplota tání materiálu nástřiku. [11]



Obr. 9 – Schéma procesu Cold Spray, upraveno z [10]

Nejvýznamnější omezení vyplývá ze samotné plastické deformace částic, která vede ke ztrátě tažnosti na úkor pevnosti. Ačkoli ztráta tažnosti může znamenat značné nevýhody, na druhou stranu zvýšení pevnosti může být využito v prospěch jiných aplikací. [10]

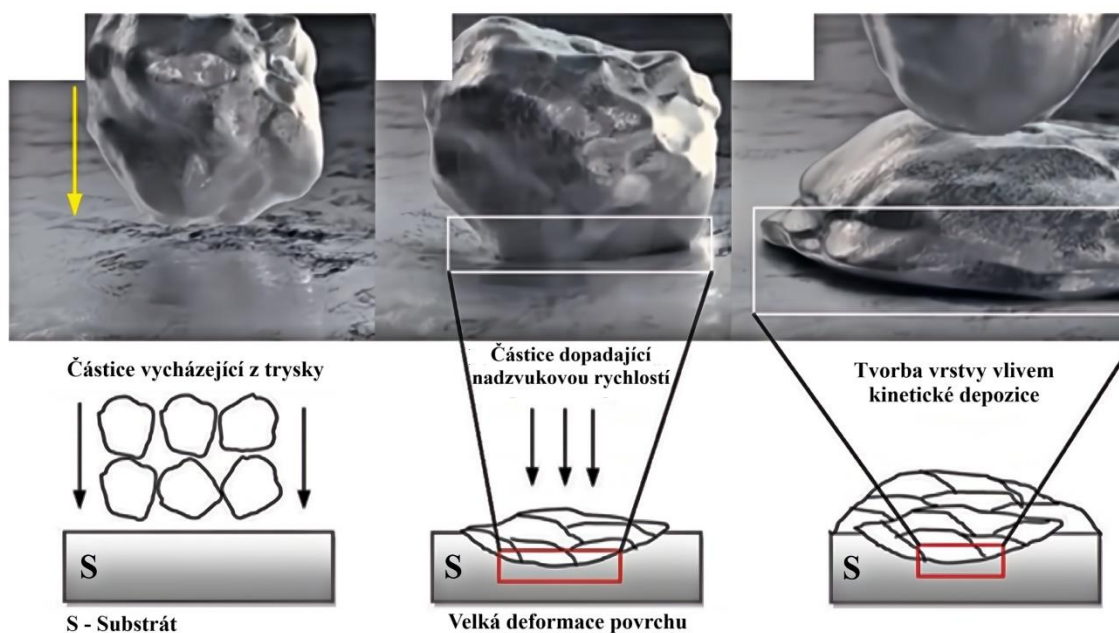


Obr. 10 – Výhody Cold Spray nástřiků, převzato z [10]

Při jiných procesech konsolidace materiálu, jako je prášková metalurgie nebo termální nástřiky, je rekrystalizace a hrubnutí zrn častým jevem, který je v mnoha případech nepříjemný. Oproti tomu při procesu Cold Spray je tepelné ovlivnění materiálu dostatečně nízké, takže obvykle nedochází k rozsáhlému růstu zrn a rekrystalizaci. To je výhodné, protože konsolidovaný materiál si může zachovat žádoucí mechanické a fyzikální vlastnosti výchozího materiálu, jako například únavovou pevnost, která silně závisí na povrchové mikrostruktuře a velikosti zrn. V některých publikacích se dokonce uvádí jemnozrnné mikrostruktury s pevností v tahu a tvrdostí, které převyšují vlastnosti ekvivalentních tvářených materiálů, což se připisuje vysokému stupni plastické deformace. [10]

Další výhodou těchto nástřiků je jejich nízká porozita a vysoká hustota. Když částice dopadají na podklad rychlostí vyšší, než je kritická rychlost materiálu, dochází k jejich plastické deformaci a ke spojování. Při takto vysoké rychlosti deformace rovněž dochází ke vzniku tepelné energie na rozhraní, což může vést ke vzniku mezifázového proudu kovových par. Tento proud ve skutečnosti způsobuje „parní depozici“ materiálu na rozhraní, která vyplňuje většinu existujících pórů a trhlin. Kromě toho každý další průchod hlavice stlačuje podkladové vrstvy, podobně jako je to u procesu kuličkování, čímž zvyšuje jejich hustotu. [11]

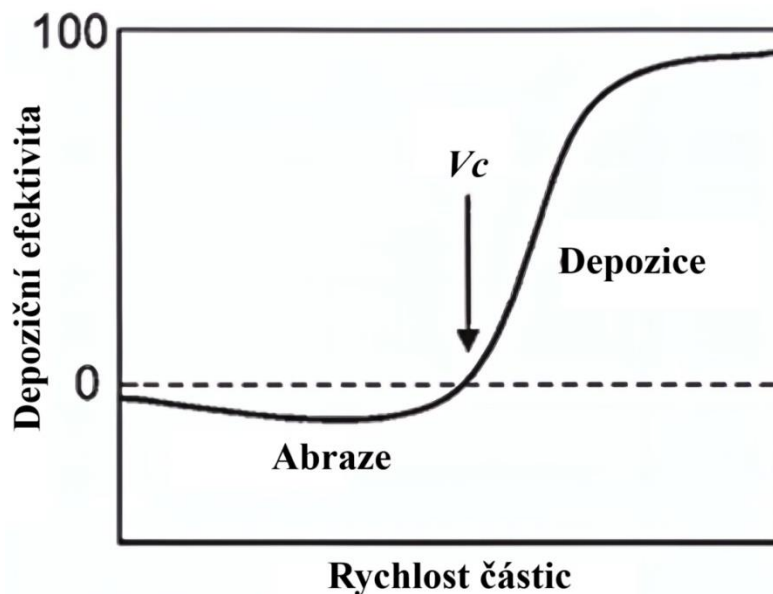
Hlavní nevýhodou metody je výrazná plastická deformace částic, vedoucí k vyčerpání plasticity povlaku. Ve studii [12] bylo ukázáno, že modul pružnosti hliníkových CS povlaků, vyrobených ze stejného materiálu jako substrát (slitina A1050) byl vyšší než Youngův modul tohoto substrátu a při zkoušce tahem docházelo rychle k praskání povlaku. Zajímavá byla skutečnost, že po žihání vzorků s CS povlaky došlo ke snížení úrovně plastické deformace vlivem relaxace napětí ve srovnání s neošetřenými vzorky. Cold Spray vrstvy ukládají velké množství energie ve formě plastické deformace, která se při zahřátí materiálu může přeměnit a využít na rekrystalizaci, jež má za následek úbytek napětí ve vrstvě a na rozhraní se substrátem. [10]



Obr. 11 – Schéma tvorby povlaku technologií Cold Spray, upraveno z [10]

Hlavními parametry CS procesu jsou tlak, teplota a nosný plyn. Pro částečné překonání vlivu snížené hustoty plynu v trysce je obvyklé provozovat CS trysky při vysokých tlacích plynu, až do 5 MPa. Se zvyšujícím se tlakem plynu se zvyšuje hustota plynu v trysce, a tím se zvyšují hnací síly plynu působícího na částice kovu pomocí tření.

Nejdůležitější podmínkou správné depozice částic je jejich kritická rychlost V_c . Při rychlostech pod hodnotou V_c dochází ke ztrátě materiálu erozí substrátu. Použitím vysokotlakého plynu, jeho přehřevu a volbou správných trysek je možno zajistit dostatečné urychlení částic pro překročení V_c , při kterém dochází k usazování částic na substrátu a tím ke zvyšování tloušťky vrstvy nanášeného materiálu. [11]



Obr. 12 – Graf vlivu rychlosti částic na depoziční efektivitu, upraveno z [10]

Dopadová rychlost částic má silný vliv na tzv. depoziční efektivitu procesu (DE nebo η). Depoziční efektivita je definována jako

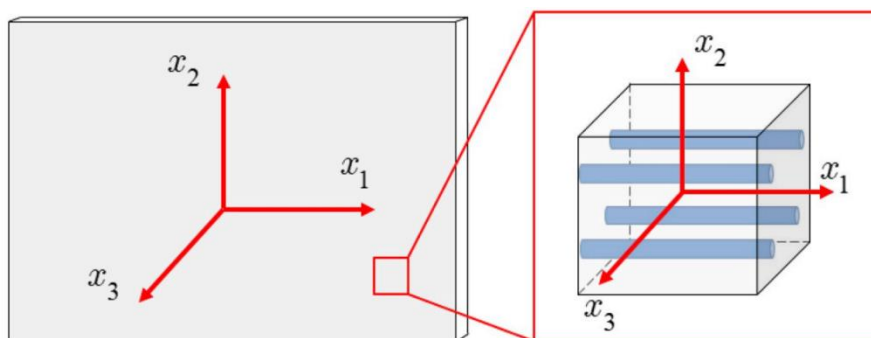
$$DE = \eta = \frac{m_{sp} - m_s}{m_{pc}} \cdot 100, \quad (14)$$

kde m_{sp} značí hmotnost substrátu s nástřikem, m_s hmotnost substrátu a m_p celkovou hmotnost dávky prášku použitého pro depozici. [10]

Jak je vidět na obr. 12, při rychlostech nižších, než V_c dochází k abrazi, tj. k odebrání substrátu. Až při překročení kritické rychlosti V_c je energie při dopadu dostatečně velká na to, aby se některé částice uchytili na povrchu. Avšak tato rychlost není z hlediska efektivity celého procesu výhodná, a proto je zapotřebí depoziční rychlost zvýšit pro dosažení co nejvyšší efektivity. Při vyšších rychlostech (>3000 m/s) napětí vzniklá při dopadu částic povlaku na substrát výrazně překračují pevnost zúčastněných materiálů, vznikají silné rázové vlny a pevné materiály se chovají jako kapaliny. Další zvyšování rychlosti dopadu má za následek přechod od depozice k silné erozi materiálu. K tomuto přechodu dochází při rychlostech dvou – až třináásobku kritické rychlosti V_c .

3.4 Kompozitní modely



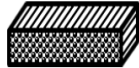
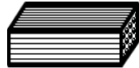
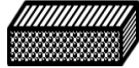

Typ a rozložení vyztužující složky určuje druh anizotropie daného kompozitního systému. To má vliv na výsledné rozložení napětí a způsob deformace kompozitní struktury. Pro analýzu je potřeba zavést tzv. reprezentativní objemový prvek (RVE), definovaný jako dostatečně velký objem materiálu, obsahující takový poměr vyztužující složky, aby bylo možné dosáhnout rovnoměrnosti ve statistickém smyslu. To znamená, že je nutné najít takový co nejmenší objemový prvek kompozitu, který by strukturně reprezentoval vlastnosti celého systému, viz obr. 13. [13]



Obr. 13 – Reprezentativní objemový prvek kompozitního systému, převzato z [14]

Kompozitní materiály mohou vykazovat různé typy symetrií. Tyto symetrie jsou znázorněny a vysvětleny v tab. 1. Izotropní materiál má materiálové charakteristiky ve všech směrech stejné, kdežto materiál ortotropní je má ve všech směrech odlišné. Materiál příčně izotropní má tzv. osu monotropie, kde ve všech rovinách kolmých na tuto osu jsou charakteristiky materiálu ve všech směrech stejné. Takovým příkladem mohou být vláknové kompozity s rovnoměrně rozloženými vlákny podél jednoho směru. [15]

Tabulka 1: Typy symetrií a jejich příslušné moduly pružnosti, upraveno z [9]

Typ materiálu	Elastické moduly	Orientace vzorku	Elastické moduly určené IEM pomocí <i>Sonelastic</i>
Izotropní	E, G, ν	-	 E, G, ν
Příčně izotropní	$E_1, E_2 = E_3,$ $G_{12} = G_{13}, G_{23},$ $\nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{23}$	1	 $E_1, G_{12} = G_{13}$
		2 ou 3	 $E_2, G_{eff} (G_{12}, G_{23})$
Ortotropní	$E_1, E_2, E_3,$ $G_{12}, G_{13}, G_{23},$ $\nu_{12}, \nu_{21},$ $\nu_{13}, \nu_{31},$ ν_{23}, ν_{32}	1	 $E_1, G_{eff} (G_{12}, G_{13})$
		2	 $E_2, G_{eff} (G_{12}, G_{23})$
		3	 $E_3, G_{eff} (G_{13}, G_{23})$

Směšovací pravidlo

Směšovací pravidlo je jedním ze základních modelů pro výpočet elastických charakteristik kompozitních materiálů, který vychází z Hookova zákona. Tento model byl odvozen na základě předpokladu, že všechny složky kompozitu, tj. matrice i výztuž vykazují lineárně-elastické chování. V závislosti na požadovaném směru počítaného Youngova modulu pružnosti byly odvozeny dva vztahy. [14] Pro výpočet Youngova modulu při zatěžování ve směru podélném (ve směru vláken či vrstev) platí při předpokladu $\varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon_f$ vztah

$$E_{c1} = E_f V_f + E_s V_s . \quad (15)$$

V případě zatěžování kolmo na směr vyztužující složky má pak rovnice tvar

$$E_{c2} = \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_s}{E_s} \right)^{-1} . \quad (16)$$

Tento vztah platí za předpokladu, že napětí působící na jednotlivé složky jsou si rovna ($\sigma_c = \sigma_s = \sigma_f$) a tedy

$$\begin{aligned} \sigma_s &= E_s \cdot \varepsilon , \\ \sigma_f &= E_f \cdot \varepsilon , \\ \sigma_c &= E_c \cdot \varepsilon . \end{aligned} \quad (17)$$

Výše zmíněný model ale nebere v potaz porozitu jednotlivých složek, a proto jsou v této práci použity modely, které tento vliv zahrnují.

Směšovací pravidlo s nelineárním modelem vlivu porozity

Dle [16] lze Youngův modul porézního materiálu vyjádřit jako

$$E_p = E_0 \left(1 - \frac{p}{p_c} \right)^n , \quad (18)$$

kde E_0 je Youngův modul daného materiálu, n je geometrický faktor pórů a zrn, p je porozita a p_c je kritická porozita, při které je Youngův modul porézního materiálu roven nule. V mnoha studiích je tento model linearizovaný a počítá se s tím, že je

$$n = 0 . \quad (19)$$

V této práci se budeme zabývat elastickými vlastnostmi nanosené vrstvy mědi. Autory práce [15] bylo zjištěno, že kritická porozita pro čistou měď je 73 %. Hodnota geometrického faktoru n byla dle [16] stanovena na 2,1.

Po dosazení rovnice (18) za E_f do rov. (15) dostaneme

$$E_c = E_s V_s + \left(E_0 \left(1 - \frac{p}{p_c} \right)^n \right) \cdot V_p, \text{ resp.} \quad (20)$$

$$p = \left(1 - \left(\frac{E_c - E_s V_s}{E_0 V_p} \right)^{\frac{1}{n}} \right) \cdot p_c, \quad (21)$$

kde E_s je Youngův modul substrátu a V_s a V_p jsou objemové podíly substrátu a porézní vrstvy.

Se znalostí Youngova modulu kompozitu (E_c) můžeme pomocí rov. (21) zjistit porozitu dané vrstvy nástřiku. Dosazením porozity do rov. (18) získáme Youngův modul porézní vrstvy.

Směšovací pravidlo s vlivem porozity

Dalším navrženým modelem je model založený na předpokladu, že člen představující porézní vrstvu ($E_p V_p$) rozdělíme směšovacím pravidlem na další dvě složky, a to na kompozit obsahující materiál dané vrstvy spolu s podílem pórů, které nenesou žádné zatížení, a tudíž mají nulový Youngův modul pružnosti. Lze tedy psát

$$E_c = E_s V_s + E_p V_p, \quad (22)$$

přičemž systém materiálu povlaku s póry je definován jako

$$E_p = E_m V_m + E_{por} V_{por}, \quad (23)$$

kde E_p , E_{por} a E_m je Youngův modul porézní vrstvy, pórů a čistého materiálu, ze kterého je vrstva vyrobena. V_{por} a V_m jsou objemové podíly pórů a materiálu tvořící porézní vrstvu. Jelikož póry nepřenáší žádné zatížení, můžeme předpokládat, že $E_{por} = 0$.

Jednotlivé objemové podíly jsou vyjádřeny jako

$$V_m = 1 - V_{por} \text{ a} \quad (24)$$

$$V_s = 1 - V_p.$$

Po dosazení rov. (23) do rov. (22) dostaneme po úpravách rovnici pro výpočet Youngova modulu porézní vrstvy

$$E_m = \frac{E_c - E_s \cdot (1 - V_p)}{V_p \cdot (1 - V_{por})}. \quad (25)$$

Výpočetní modely IEM založené na tuhosti nosníku

Tyto modely jsou odvozeny z Euler-Bernoulliho teorie pro ohyb nosníku a dávají do kontextu rezonanční frekvenci s rozměrovými a materiálovými vlastnostmi ohýbaného tělesa. Na základě této teorie byla odvozena rovnice

$$f_n = \frac{X_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}, \quad (26)$$

kde f_n je rezonanční frekvence pro n -tý vibrační mód, X_n je konstanta, která obsahuje okrajové podmínky tělesa, L je délka tělesa, E je Youngův modul pružnosti, I označuje kvadratický moment průřezu, ρ je hustota a S je plocha.

V průběhu ohybu je těleso vystaveno ohybovému momentu, přičemž odpor materiálu vůči ohybu nazýváme ohybová tuhost ($E \cdot I$). Ohybovou tuhost kompozitního materiálu lze vyjádřit součtem tuhostí všech jeho složek. Pro dvousložkový kompozit tedy platí

$$E_t I_t = E_s I_s + E_c I_c, \quad (27)$$

kde indexy t , s a c označují kompozit, substrát a povlak. Hustotu na jednotku plochy pak můžeme vyjádřit jako

$$\rho_t S_t = \rho_s S_s + \rho_c S_c. \quad (28)$$

Nahrazením $E \cdot I$ a ρS členy $E_t I_t$ a $\rho_t S_t$ v rov. (28) dostaneme vztah pro rezonanční frekvenci kompozitního nosníku [17]

$$f_t = \frac{X_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{E_t I_t}{\rho_t S_t}}. \quad (29)$$

Lopézuv model

Pro kompozitní nosník s obdélníkovým průřezem Lopez [15] vyvinul analytický výraz pro výpočet Youngova modulu povlaku. Pro poměr rezonančních frekvencí platí vztah

$$(R_f)^2 = \frac{1 + R_E(3R_h + 6R_h^2 + 4R_h^3)}{1 + R_h R_p}, \quad (30)$$

kde

$$\begin{aligned}
 R_h &= \frac{h_c}{h_s}, \\
 R_\rho &= \frac{\rho_c}{\rho_s}, \\
 R_f &= \frac{f_t}{f_s}, \\
 R_E &= \frac{E_c}{E_s}.
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

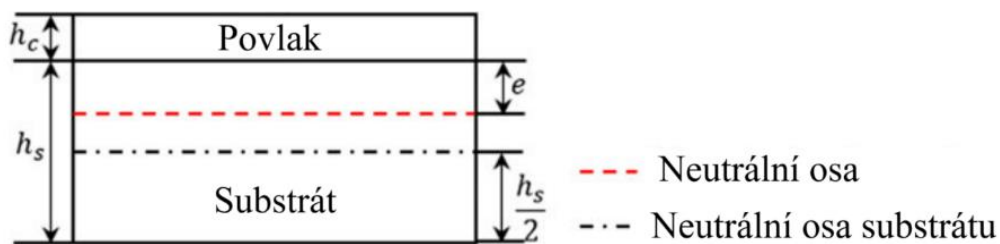
Youngův modul povlaku lze potom vyjádřit jako

$$E_c = \frac{E_s}{3R_h + 6R_h^2 + 4R_h^3} \left[[(R_f)^2(1 + R_h R_\rho)] - 1 \right].
 \tag{32}$$

Tento model nezahrnuje změnu neutrální osy vlivem přítomnosti povlaku, což nemusí mít velký vliv u tenkých vrstev, pro které se tento model často využívá. Avšak u tlustších vrstev dochází k posunu neutrální osy směrem k povlaku, a to výrazně ovlivňuje výsledné hodnoty Youngova modulu. [18]

Pautrotův model

Pautrotův model vychází z Lopézova modelu a byl navržen tak, aby zahrnoval posun neutrální osy vlivem povlaku. Toho je vhodné využít v případě tlustších vrstev, jako jsou například vrstvy vytvořené pomocí metody Cold Spray. [18]



Obr. 14 – Znárodnění posuvu neutrální osy vlivem povlaku, upraveno z [18]

Poměr rezonančních frekvencí je v tomto případě vyjádřen jako

$$(R_f)^2 = \frac{1 + R_h^3 R_E + \frac{3R_h R_E (1 + R_h)^2}{1 + R_h R_E}}{1 + R_h R_E}.
 \tag{33}$$

Doplněním výše zmíněných poměrů a vyjádřením E_c získáme rovnici pro výpočet Youngova modulu povlaku

$$E_c = \frac{E_s}{2R_h^4} \left[(R_h + R_\rho R_h^2)(R_f)^2 - 4R_h^3 - 6R_h^2 - 4R_h \right. \\ \left. + (4R_h^4[(1 + R_h R_\rho)(R_f)^2 - 1] \right. \\ \left. + [4R_h^3 + 6R_h^2 + 4R_h - (R_h + R_\rho R_h^2)(R_f)^2]^2)^{0,5} \right]. \quad (34)$$

4 Experimentální část

V experimentální části předložené práce byla měřena základní rezonanční frekvence pomocí IET pro zjištění modulu pružnosti v tahu povlaků nanesených metodou Cold Spray. Pro zjištění úrovně porozity povlaků bylo využito obrazové analýzy. Dále byla na zhotovených vzorcích provedena nanoindentační zkouška pro určení indentačních Youngových modulů povlaku, se kterými byly srovnávány výpočetní modely navržené v přecházející kapitole. Byla rovněž provedena excitační zkouška na samostatné vrstvě, sejmuté z jednoho z připravených zkušebních těles. Jednalo se o další způsob ověření výpočetních modelů.

4.1 Zvolené materiály

Jako materiál substrátu byla použita tvářená hliníková slitina EN AW-5083 H111 ve formě plechu tloušťky 8 mm. Jedná se o stejný materiál jako byl použitý v práci [3]. Stejně tak byla použita čistá měď jako materiál povlaku. Tato kombinace byla zvolena pro dobrou přilnavost měděného prášku na hliníkovém substrátu, což snižuje riziko dekoheze při zpracovávání vzorků. [4]

Slitina EN AW-5083 H111 je tepelně nevytvrditelná slitina. Hlavní předností této slitiny je odolnost vůči korozi i v agresivnějším prostředí, kterou zprostředkovává přidaný hořčík (4,5 %).

Povlak byl tvořen měděným práškem se střední velikostí zrn 15 až 38 μm a čistotou více než 99,95 % Cu. Prášek byl vytvořen pomocí plynové atomizace a je vhodný pro Cold Spray aplikace. Volbou správných parametrů nástřiku lze s tímto práškem dosáhnout depoziční účinnosti až 99 %. [19]

4.2 Příprava zkušebních těles

Pro účely práce bylo metodou CS vytvořeno několik sad zkušebních těles, lišících se tloušťkou nástřiku. Vzhledem k tomu, že do dále uvedených experimentů, úvah a výpočtů byla zahrnuta i zkušební tělesa dříve vytvořená v rámci studie [3], byly pro nanesení práškových vrstev na hliníkový substrát použity stejné parametry jako v uvedené práci. Teplota ohřevu byla 450 °C, tlak 3 MPa (30 barů), rychlost nanášení 200 mm/s a rozestup přechodů 1 mm. Použito bylo zařízení Impact Innovations Cold Spray system 5/11 (obr. 15).



Obr. 15 – Zařízení Impact Innovations Cold Spray system 5/11, převzato z [20]

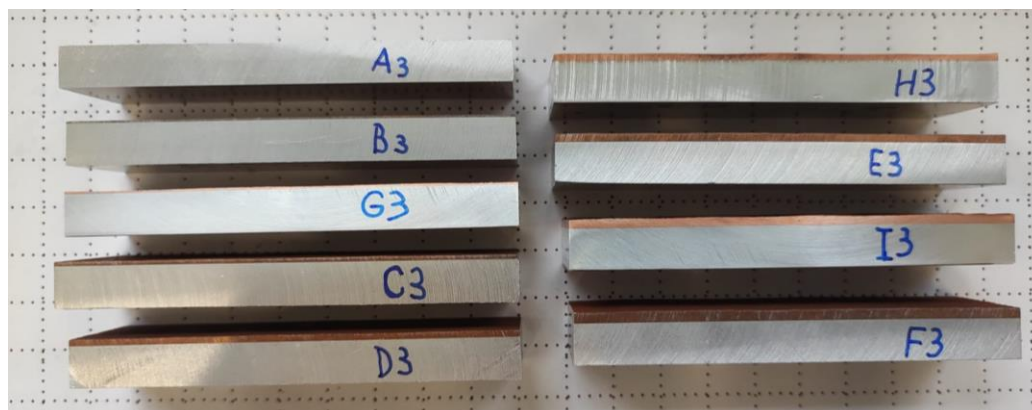
Označení jednotlivých sad vzorků spolu s přibližnými tloušťkami vrstev je uvedeno v tab. 2.

Tabulka 2: Přibližné tloušťky vrstev jednotlivých skupin vzorků

Označení	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Přibližná tloušťka povlaku [μm]	0	400	800	1200	1600	2000	400	1400	1800

Pozn.: u vzorků řady „C“ došlo oproti ostatním sadám při odběru zkušebních těles k záměně orientace vzorků vzhledem ke směru nástřiku a tělesa této řady proto nebyla zahrnuta do dalších analýz.

Každá z nástříkaných desek o rozměrech přibližně 96×96 mm (obr. 16) byla na metalografické pile Leco MSX 250 rozdělena na tři části, které byly frézováním opracovány do finálního tvaru vzorků s rozměry přibližně 85×25 mm. Jednotlivá tělesa v každé sadě byla označena pořadovým číslem (A1 až A3, B1 až B3 atd.).



Obr. 16 – Boční pohled na zkušební tělesa

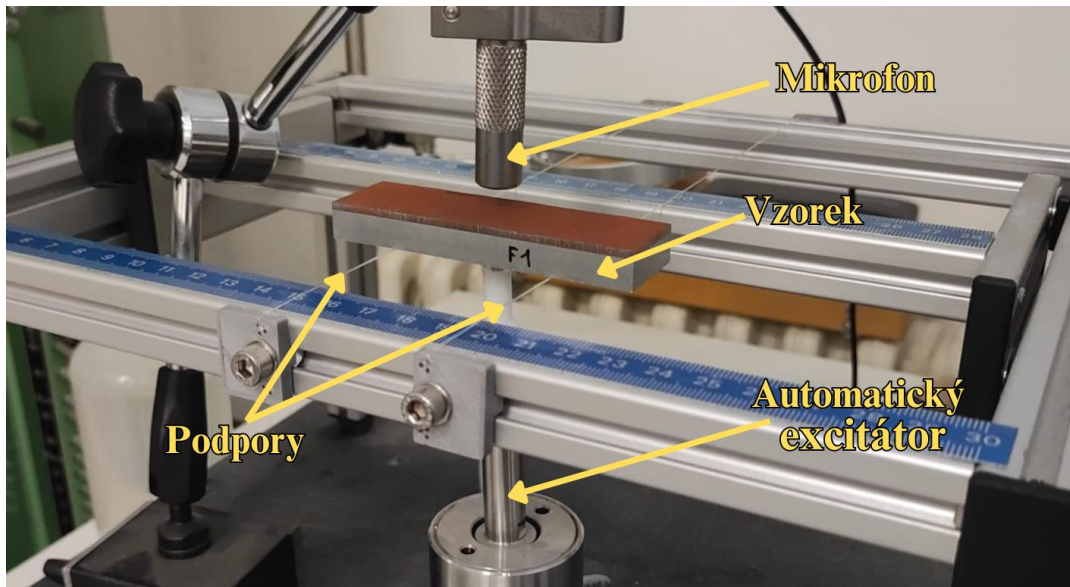
4.3 Impulzní excitační metoda

Pro stanovení elastických charakteristik pomocí impulzní excitační metody (IEM) bylo nezbytné přesně změřit rozměry každého tělesa. Délka a šířka každého vzorku byla měřena na 10 místech pomocí digitálního posuvného měřítka, a tyto hodnoty byly následně zprůměrovány. Stejný postup byl použit i pro měření celkové tloušťky tělesa (substrát + vrstva), která byla zaznamenána na 15 místech a poté zprůměrována. Každý vzorek byl dále zvážen pomocí váhy Kern 572 s přesností na 0,01 g.

Pro měření tloušťky samotné vrstvy byla zvolena obrazová analýza, provedená pomocí mikroskopu Olympus SZX10. Tloušťka byla měřena v 15 místech, výsledná tloušťka byla určena jako aritmetický průměr všech měření.

Pro měření rezonančních frekvencí a Youngova modulu bylo využito zařízení RFDA system 24 z produkce firmy IMCE, sestávající z měřícího stolku, mikrofonu a automatického excitátoru. Uvedená sestava byla propojena se stolním počítačem, ovládajícím průběh experimentu a provádějícím analýzu signálu. Excitátor byl umístěn zespodu tak, aby udeřil uprostřed

zkoušeného tělesa, zatímco mikrofon byl umístěn ve stejné pozici na opačné straně tělesa, tedy shora.



Obr. 17 – Měřicí sestava pro IEM

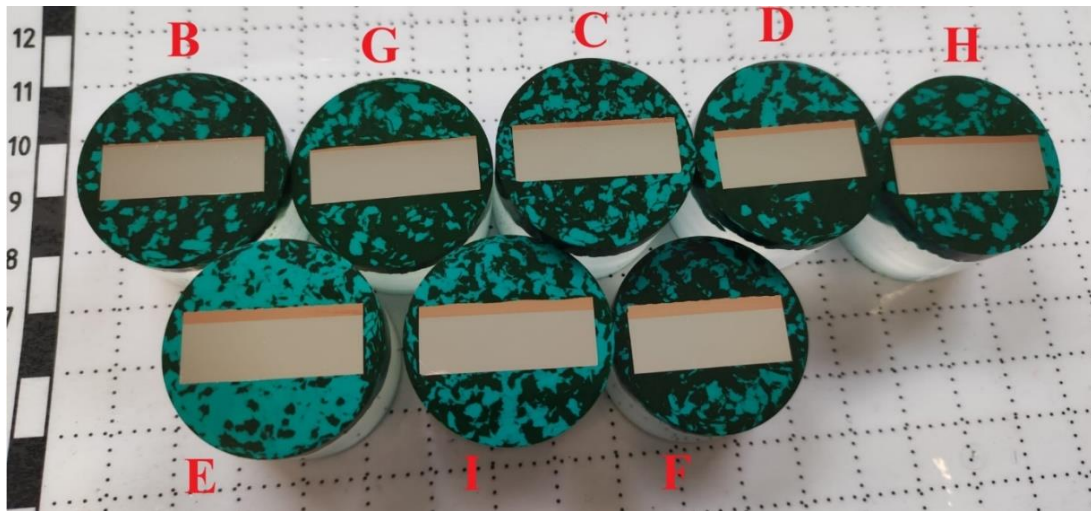
Pro získání Youngova modulu pružnosti byla zkouška prováděna v ohybovém módu s úderem směrem k substrátu, jak je znázorněno na obr. 17. Toto uspořádání bylo zvoleno zejména s ohledem na minimalizaci poškození vrstvy při opakovaných úderech excitátoru do zkušebního tělesa. Pro ověření vlivu orientace vzorku (excitované strany) vzhledem k poloze excitátoru na výsledky experimentů byla testována také varianta, kdy úder směřovaly k povlaku. Ukázalo se, že změna orientace vzorku vzhledem k poloze excitátoru nemá významný vliv na výsledné hodnoty Youngova modulu.

Vlastní měření probíhalo v souladu s normou ASTM E-1876 [1]. Vzorek byl umístěn na podpory, okraje vzorku byly ve vzdálenosti $0.224 \times L$ od podpor. Každý vzorek byl desetkrát excitován, výsledná hodnota Youngova modulu byla určena jako aritmetický průměr jednotlivých měření.

4.4 Nanoindentace

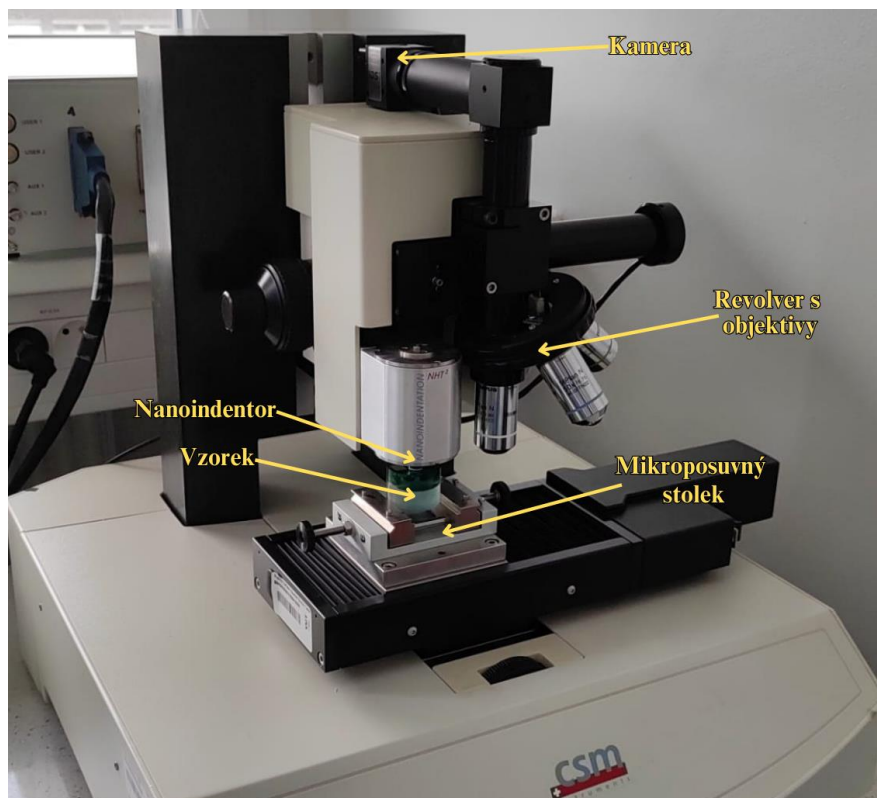
V práci [3] byly pro porovnání správnosti výpočetních modelů použity tabulkové hodnoty elastických charakteristik čisté mědi. V předkládané práci je použit exaktnější přístup, kdy jsou výsledky modelových výpočtů porovnány s reálně naměřenými hodnotami elastických charakteristik, určenými pomocí nanoindentace

Pro tento účel byl z každé skupiny vzorků (označených jako A1-I3) vybrán jeden exemplář, ze kterého byl (po provedení impulsní excitační metody) zhotoven metalografický vzorek vhodný pro provedení nanoindentační zkoušky. Vzorek byl připraven tak, aby bylo možné testovat vrstvu v jejím průřezu, jak je patrné z obr. 18.



Obr. 18 – Metalografické výbrusy pro nanoindentační zkoušku

Samotná zkouška byla provedena na přístroji CSM TTX NHT2 (obr. 19) v souladu s normou ČSN EN ISO 14577 [21]. Zkouška byla provedena při dvou zatíženích, 5 mN a 100 mN, aby bylo možné posoudit vliv tohoto parametru na hodnotu indentačního Youngova modulu. Jako vstupní hodnotu pro vlastní měření bylo nutné zvolit hodnotu Poissonova poměru μ . U všech vzorků byla použita hodnota $\mu = 0,34$ pro čistou měď dle [22]. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na práce [23] a [24], kde bylo zjištěno, že při procesu Cold Spray nedochází k výraznému ovlivnění hodnoty Poissonova poměru.



Obr. 19 – Nanoindenter CSM TTX NHT2

Každý vzorek byl testován pomocí uvedených zatížení uprostřed dané vrstvy v polovině vzorku, aby byl minimalizován vliv substrátu či povrchu na vlastní měření. Vzdálenosti mezi jednotlivými vpichy byly minimálně pětinásobkem šířky vtisku, aby nedošlo k ovlivnění hodnot v důsledku zpevnění materiálu v okolí vtisku plastickou deformací. Pro každé zatížení bylo provedeno 15 vpichů, aby bylo možné získat alespoň deset správných hodnot po odstranění neplatných zkušebních cyklů. Neplatná zkouška může nastat např. v důsledku vibrací stroje nebo vpichu na hranici splatek. Platné experimentální výsledky byly zprůměrovány, a takto získaná hodnota Youngova modulu sloužila jako referenční hodnota pro modelové výpočty této charakteristiky na základě měření prostřednictvím IEM.

5 Výsledky

5.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem zvoleného substrátu byla provedena v práci [3], zde jsou uvedeny výsledky těchto zkoušek. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [25] na zkušebním stroji Zwick/Roell Z250 Allround-Line, tCII. Tvar zkušebních těles odpovídal normě DIN 50125 – E8 × 25 × 80 [26].

Tabulka 3: Materiálové charakteristiky slitiny EN AW-5083 H111, převzato z [3]

	E [Gpa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A [%]
S1	72,7	163	317	19,4	21
S2	73,36	164	318	17,3	20,8
Průměr	73,03	163,5	317,5	18,4	20,9

5.2 Impulzní excitační metoda

Rozměry a hmotnosti zkušebních těles, vstupující do IET jsou uvedeny v tab. 4. Tloušťky povlaku a substrátu, získané obrazovou analýzou jsou obsahem tab. 5.

Po provedení všech měření byla sejmuta nanosená vrstva ze zkušebního tělesa s největší tloušťkou povlaku (řada F, tl. vrstvy přibližně 2 mm) pro provedení impulzní excitační zkoušky na samostatné vrstvě čisté mědi. Tímto způsobem bylo možné porovnat materiálové charakteristiky sejmuté vrstvy s výsledky získanými pomocí nanoindentační zkoušky.

Tabulka 4: Rozměry a hmotnosti zkušebních těles

Č. vzorku	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Délka L [mm]	85,46	85,59	85,80	85,33	85,37	85,30
Šířka b [mm]	23,94	23,98	24,03	23,17	23,25	23,25
Celková tloušťka t [mm]	8,01	8,01	8,03	8,50	8,47	8,51
Váha m [g]	43,55	43,71	43,83	49,00	49,08	49,14
Č. vzorku	D1	D2	D3	E1	E2	E3
Délka L [mm]	85,68	85,65	85,65	86,18	86,25	86,25
Šířka b [mm]	22,64	22,68	22,64	24,29	24,28	24,39
Celková tloušťka t [mm]	9,36	9,29	9,34	9,73	9,78	9,73
Váha m [g]	61,92	61,87	61,71	74,25	74,25	74,40
Č. vzorku	F1	F2	F3	G1	G2	G3
Délka L [mm]	85,97	85,98	85,91	85,08	84,97	84,97
Šířka b [mm]	23,75	23,75	23,83	24,95	24,89	25,01
Celková tloušťka t [mm]	10,26	10,23	10,17	8,50	8,51	8,51
Váha m [g]	79,92	79,79	79,78	52,51	52,29	52,62
Č. vzorku	H1	H2	H3	I1	I2	I3
Délka L [mm]	84,95	84,94	84,93	84,97	85,03	85,02
Šířka b [mm]	24,96	25,03	25,02	25,04	24,77	25,08
Celková tloušťka t [mm]	9,41	9,43	9,36	9,72	9,82	9,83
Váha m [g]	68,06	68,24	68,24	76,46	75,32	76,41
Č. vzorku	Sejmutá vrstva					
Délka L [mm]	40,4					
Šířka b [mm]	13,1					
Celková tloušťka t [mm]	1,97					
Váha m [g]	9,3					

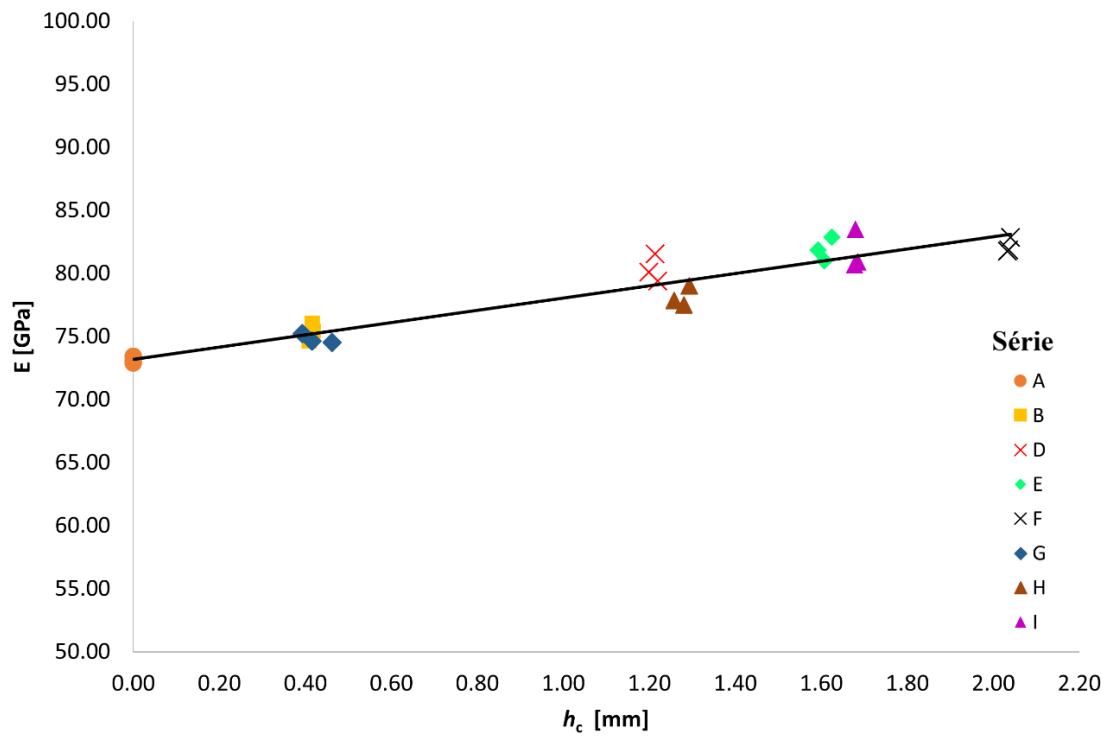
Tabulka 5: Tloušťky povlaku a substrátu

Č. vzorku	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Tl. Povlaku h_c [mm]	0,00	0,00	0,00	0,42	0,42	0,41
Tl. Substrátu h_s [mm]	8,01	8,01	8,03	8,08	8,05	8,10
Č. vzorku	D1	D2	D3	E1	E2	E3
Tl. Povlaku h_c [mm]	1,22	1,21	1,20	1,63	1,61	1,59
Tl. Substrátu h_s [mm]	8,14	8,08	8,14	8,11	8,18	8,13
Č. vzorku	F1	F2	F3	G1	G2	G3
Tl. Povlaku h_c [mm]	2,04	2,03	2,04	0,39	0,46	0,42
Tl. Substrátu h_s [mm]	8,22	8,20	8,13	8,11	8,04	8,09
Č. vzorku	H1	H2	H3	I1	I2	I3
Tl. Povlaku h_c [mm]	1,26	1,28	1,29	1,68	1,68	1,68
Tl. Substrátu h_s [mm]	8,15	8,15	8,06	8,04	8,14	8,15

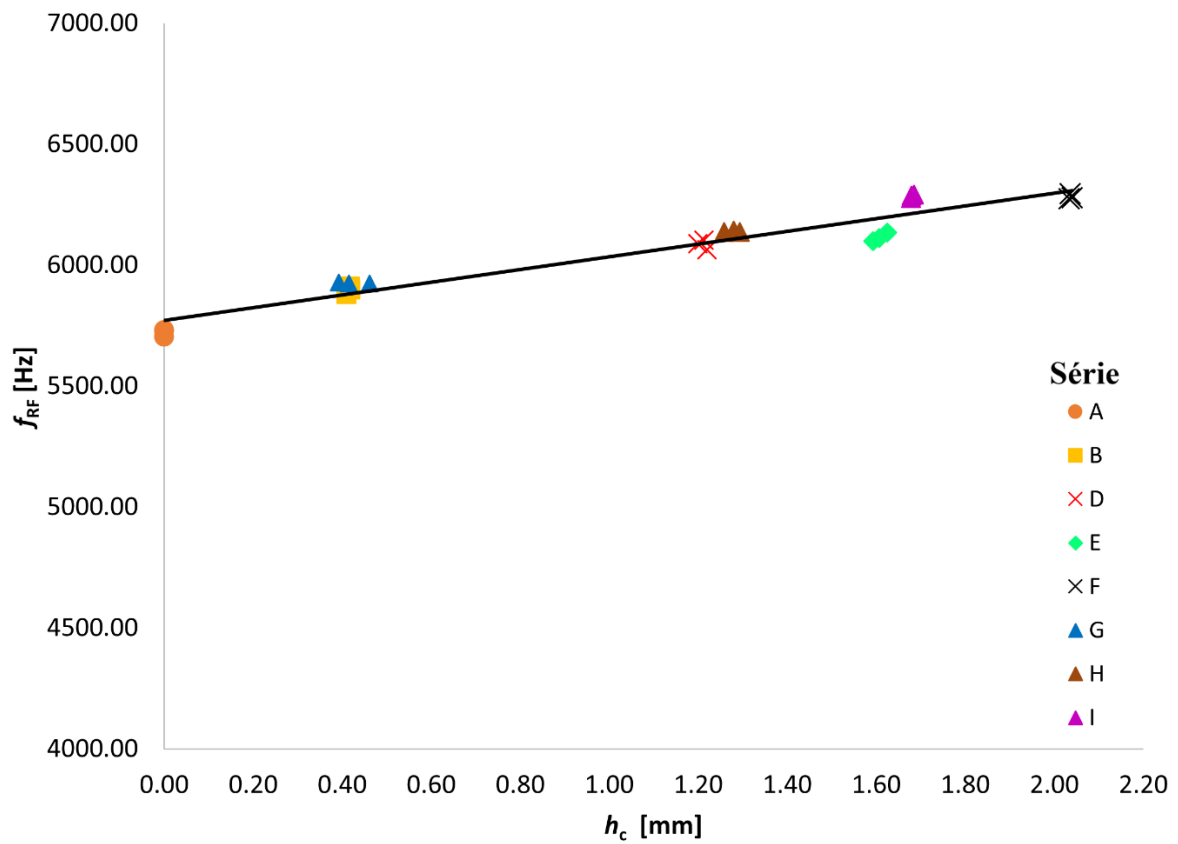
Naměřené hodnoty rezonančních frekvencí (f_{RF}), vnitřního tlumení (Q^{-1}) a korespondujících modulů pružnosti (E) jsou obsaženy v tab. 6 a v grafické podobě v závislosti na tloušťce povlaku uvedeny v obr. 20 a obr. 21.

Tabulka 6: Hodnoty rezonančních frekvencí (f_{RF}), vnitřního tlumení (Q^{-1}) a modulů pružnosti (E) vzorků (systém substrát + povlak)

Č. vzorku	A1	A2	A3	B1	B2	B3
E [GPa]	73,08	73,42	72,89	76,05	75,42	74,62
f_{RF} [Hz]	5732	5728	5705	5912	5899	5880
Q^{-1} [-]	0,00238	0,00459	0,00227	0,00528	0,00527	0,00436
Č. vzorku	D1	D2	D3	E1	E2	E3
E [GPa]	79,42	81,56	80,11	82,87	81,02	81,85
f_{RF} [Hz]	6064	6104	6089	6136	6113	6100
Q^{-1} [-]	0,00422	0,00491	0,00497	0,00394	0,00458	0,00398
Č. vzorku	F1	F2	F3	G1	G2	G3
E [GPa]	81,86	81,78	82,85	75,25	74,53	74,64
f_{RF} [Hz]	6295	6274	6279	5928	5925	5925
Q^{-1} [-]	0,00331	0,00294	0,00327	0,00066	0,00064	0,00067
Č. vzorku	H1	H2	H3	I1	I2	I3
E [GPa]	77,86	77,49	79	83,5	80,68	80,95
f_{RF} [Hz]	6138	6144	6137	6287	6276	6292
Q^{-1} [-]	0,00077	0,00075	0,00074	0,00079	0,00076	0,00082
Č. vzorku	Sejmutá vrstva					
E [GPa]	116,26					
f_{RF} [Hz]	4465					
Q^{-1} [-]	0,00105					



Obr. 20 – Závislost Youngova modulu na tloušťce povlaku



Obr. 21 – Závislost rezonanční frekvence na tloušťce povlaku

Experimentálními daty byly proloženy lineární závislosti ve tvaru

$$E = 4,85h_c + 73,2 \quad (35)$$

a

$$f_{RF} = 262,58h_c + 5772,7. \quad (36)$$

Tyto závislosti byly zvoleny na základě nejvyšší hodnoty koeficientu korelace.

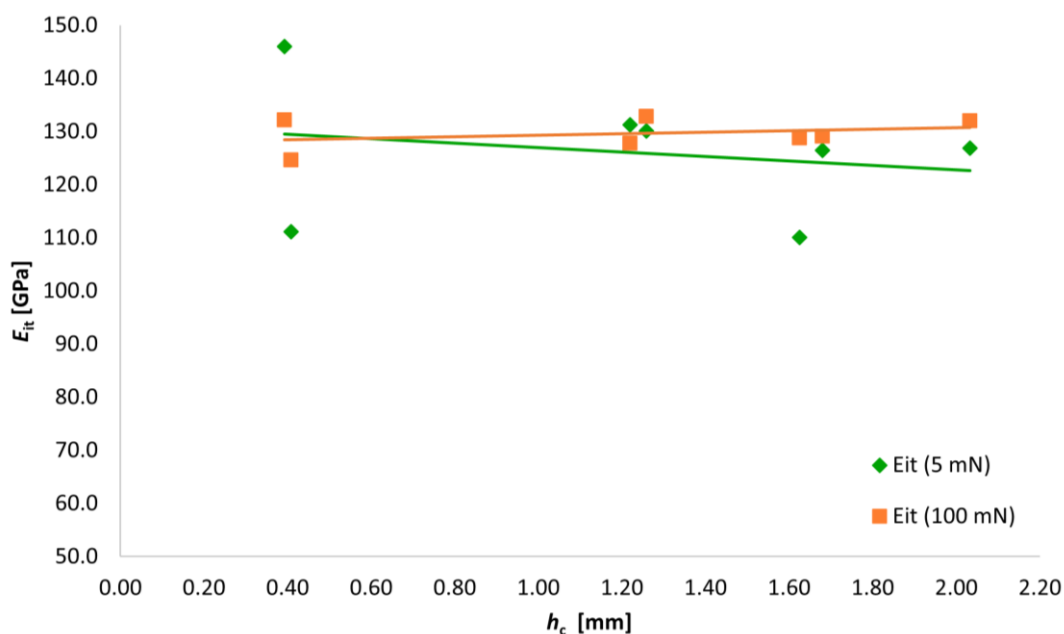
5.3 Nanoindentace

V tab. 7 jsou pro jednotlivé tloušťky vrstev uvedeny naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro zatížení 5 mN a 100 mN.

Tabulka 7: Indentační Youngův modul pružnosti vzorků při zatíženích 5 mN a 100 mN

Č. vzorku	B3	D1	E1	F2	G1	H1	I1	PRŮMĚR
Tl. Povlaku h_c [mm]	0,41	1,22	1,63	2,03	0,39	1,26	1,68	-
$E_{it, stř \pm s}$ (5 mN) [GPa]	111,2 ± 15,4	131,3 ± 10,0	110,1 ± 24,4	126,9 ± 13,0	146,0 ± 12,5	130,1 ± 8,0	126,4 ± 12,2	126,0 ± 13,6
$E_{it, stř \pm s}$ (100 mN) [GPa]	124,6 ± 4,8	127,8 ± 7,4	128,8 ± 4,5	132,0 ± 4,3	132,2 ± 3,4	132,9 ± 5,1	129,1 ± 7,7	129,6 ± 5,3

Výsledky zobrazené v grafu na obr. 22 byly opět proloženy lineární funkcí.



Obr. 22 – Závislost indentačních modulů pružnosti na tloušťce povlaku

5.4 Výpočty modulu pružnosti v tahu

Youngovy moduly pružnosti E , naměřené prostřednictvím IEM sloužily jako vstupní údaje pro výpočty, založené na směšovací pravidle (vč. zahrnutí vlivu porozity) a modelu Pautrotově. Jelikož model založený na směšovací pravidle vykazoval nejlepší výsledky při porovnání s tabulkovou hodnotou čisté mědi (130 GPa), je v předložené práci navržen model využívající vztahu uvedeného v práci [16], a který do směšovacího pravidla zavádí i vliv porozity nanesené vrstvy.

5.4.1 Směšovací pravidlo

Směšovací pravidlo se řídí rovnicí (15), kde objemový podíl matrice a výztuže (povlaku) V_m a V_f lze vyjádřit jako

$$V_m = 1 - V_f \quad (37)$$

a

$$V_f = \frac{h_c}{t}, \quad (38)$$

kde h_c je tloušťka povlaku a t celková tloušťka zkušební tělesa.

Youngův modul pružnosti v tahu povlaku tak lze popsat vztahem

$$E_f = \frac{E_c - E_m(1 - V_f)}{V_f}. \quad (39)$$

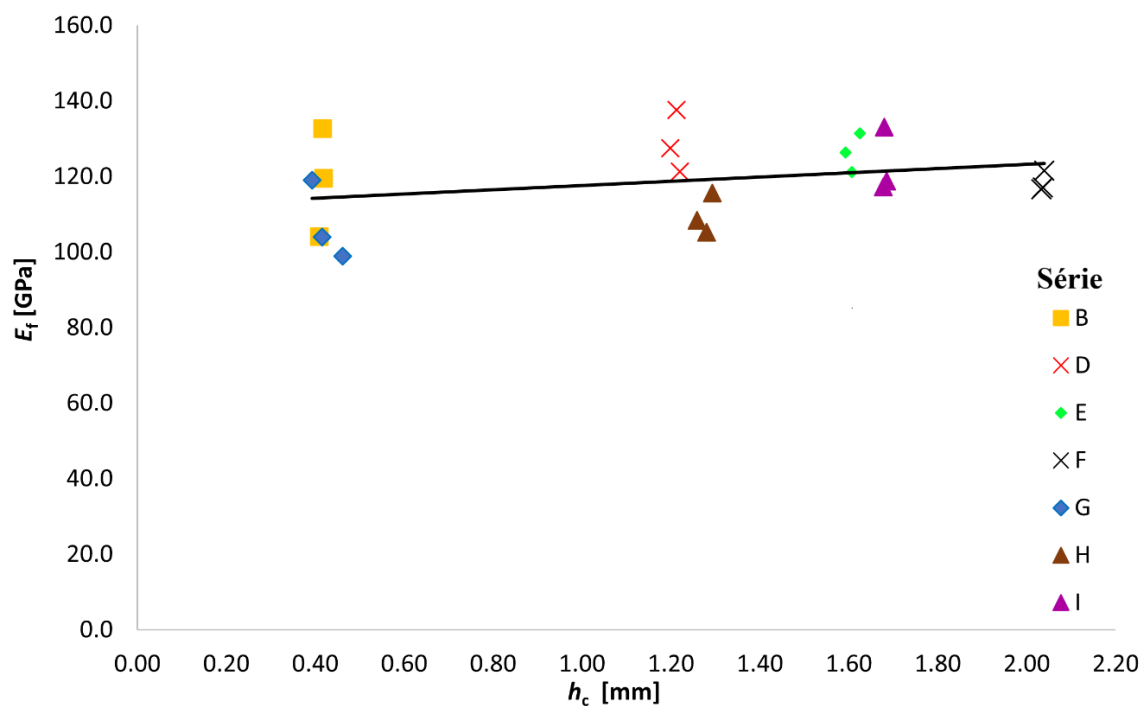
Hodnoty modulu pružnosti povlaků, vypočtené pomocí výše zmíněné rovnice (39) jsou uvedeny v tab. 8 společně se střední hodnotou a směrodatnou odchylkou pro každou skupinu vzorků. Hodnoty byly pomocí metody nejmenších čtverců proloženy lineární závislostí

$$E_f = 5,64h_c + 112,00 \quad (40)$$

a vykresleny v grafu na obr. 23.

Tabulka 8: Youngovy moduly pružnosti měděných povlaků spolu se střední hodnotou a směrodatnou odchylkou – směšovací pravidlo

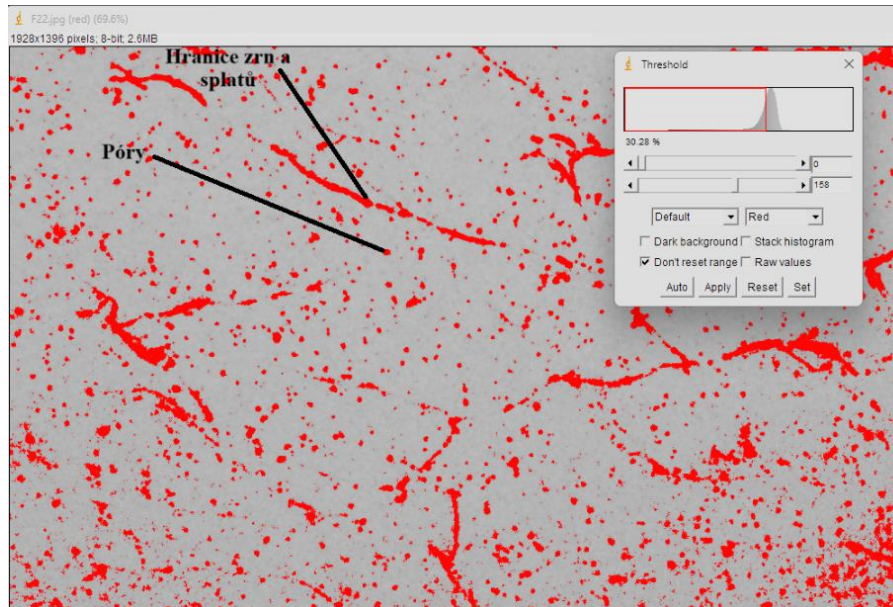
Č. vzorku	B1	B2	B3	C1	C2	C3
E_f [GPa]	132,7	119,5	104,1	132,9	132,2	141,3
$E_{f, stř \pm s}$ [GPa]	118,8 \pm 11,7			135,5 \pm 4,1		
Č. vzorku	D1	D2	D3	E1	E2	E3
E_f [GPa]	121,4	137,7	127,5	131,5	121,2	126,4
$E_{f, stř \pm s}$ [GPa]	128,8 \pm 6,7			126,3 \pm 4,2		
Č. vzorku	F1	F2	F3	G1	G2	G3
E_f [GPa]	117,1	116,7	121,6	119,0	98,9	104,0
$E_{f, stř \pm s}$ [GPa]	118,5 \pm 2,2			107,3 \pm 8,5		
Č. vzorku	H1	H2	H3	I1	I2	I3
E_f [GPa]	108,5	105,3	115,6	133,1	117,3	118,8
$E_{f, stř \pm s}$ [GPa]	109,8 \pm 4,3			123,1 \pm 7,1		



Obr. 23 – Graf závislosti Youngova modulu pružnosti povlaku na jeho tloušťce – směšovací pravidlo

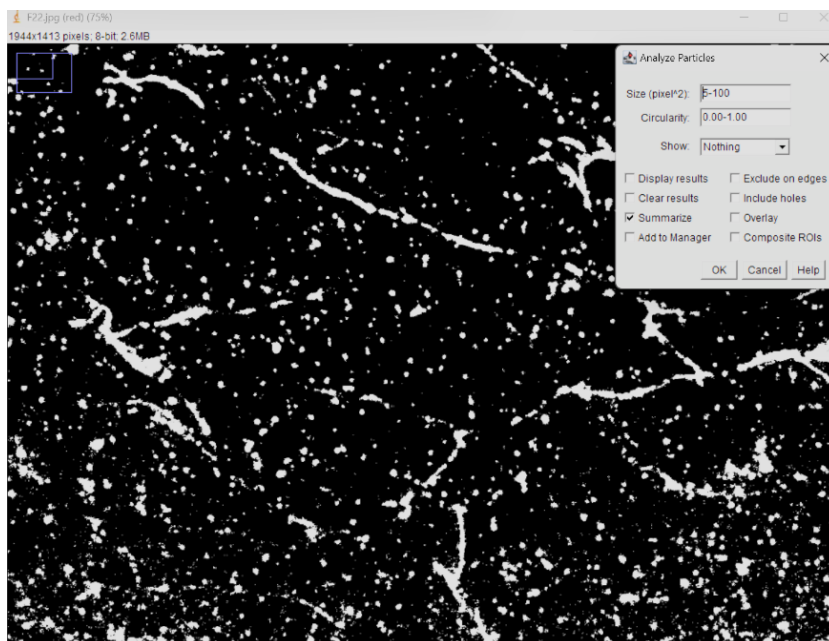
5.4.2 Analýza porozity

Úroveň porozity byla měřena na vzorcích uvedených na obr. 18, které byly zároveň použity pro nanoindentační zkoušky. Měření bylo provedeno pomocí obrazové analýzy softwarem ImageJ dle postupu navrženým v práci [27]. Obraz byl nejprve převeden na monochromatický, nejlépe kontrastní formát, na kterém nejlépe vynikne porozita. Prahování bylo provedeno na zaostřené oblasti obrazu.



Obr. 24 – Rozhraní softwaru ImageJ při nastavení hranice prahování snímku ze světelného mikroskopu

Úroveň prahování byla nastavena tak, aby byly zahrnuty všechny póry. Bohužel ve většině případů při této úrovni docházelo také k zahrnutí hranic zrn a splatů do celkové úrovně porozity, což ji mnohonásobně zvyšuje. Vliv hranic a splatů byl eliminován analýzou průměrné pixelové velikosti pórů tak, aby do výpočtu nebyly zahrnuty defekty rozměrově převyšující průměrnou velikost pórů (viz obr. 25).



Obr. 25 – Nastavení rozsahu velikostí póru zahrnutých v analýze

Na každém vzorku bylo provedeno 5 snímků, ze kterých byla vyhodnocena porozita, která byla následně zprůměrována. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 9.

Tabulka 9: Hodnoty porozity vybraných vzorků

Č. vzorku	B3	D1	E1	F2	G1	H1	I1
Tl. Povlaku h_c [mm]	0.41	1.22	1.63	2.03	0.39	1.26	1.68
p [%]	1.85	1.54	1.65	2.34	0.47	0.65	1.45

5.4.3 Směšovací pravidlo s vlivem porozity

Hodnoty modulů pružnosti se zahrnutím vlivu porozity vypočtené pomocí rovnice (25) jsou uvedeny v tab. 10. Pro E_c byly použity hodnoty kompozitního systému substrátu s povlakem naměřené pomocí IEM (viz tab. 6) a E_s je průměrná hodnota modulu pružnosti hliníkového substrátu. Za hodnoty objemových podílů V_{por} byly dosazeny hodnoty porozity uvedené v tab. 9. Objemové podíly porézní vrstvy V_p byly poté vypočteny pomocí vztahu

$$V_p = \frac{h_c}{t}. \quad (41)$$

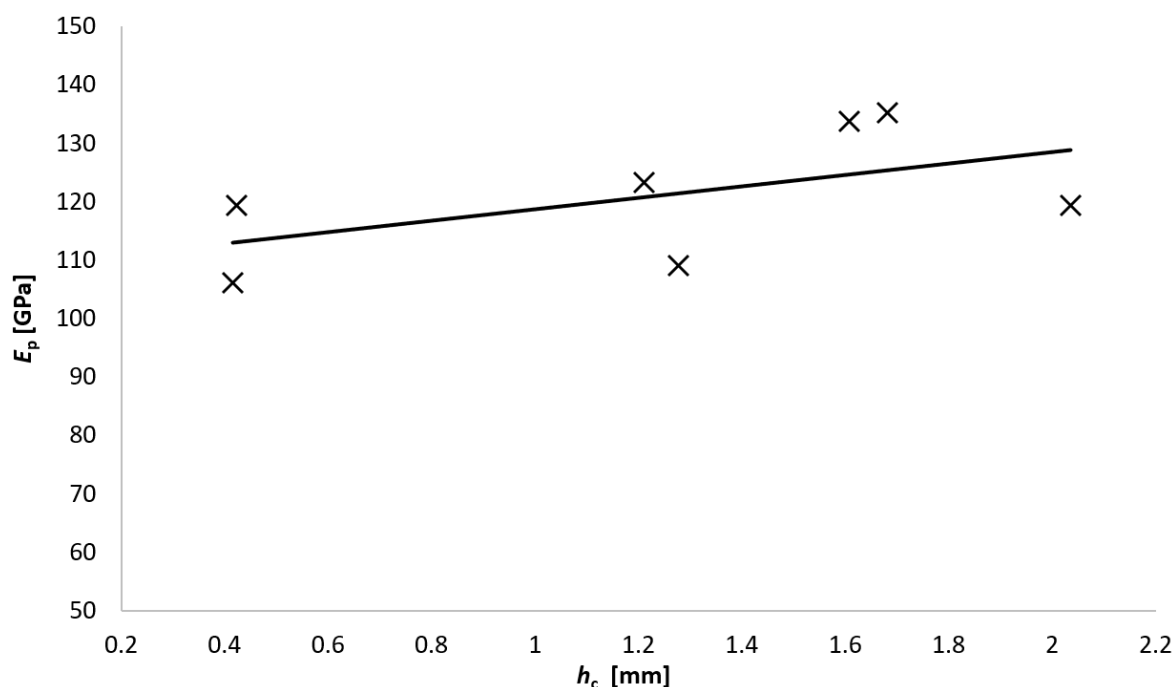
V grafu na obr. 26 jsou hodnoty proloženy lineární funkcí ve tvaru

$$E_p = 9,8 h_c + 108,8 . \quad (42)$$

Funkce byla zvolena na základě práce [28], podle které by měl být modul pružnosti povlaku nezávislý na jeho tloušťce, a měl by tedy vykazovat lineární průběh.

Tabulka 10: Hodnoty Youngova modulu pružnosti se zahrnutím vlivu porozity

Č. vzorku	B3	D1	E1	F2	G1	H1	I1
E_p [GPa]	106,1	123,3	133,7	119,5	119,6	109,2	135,1



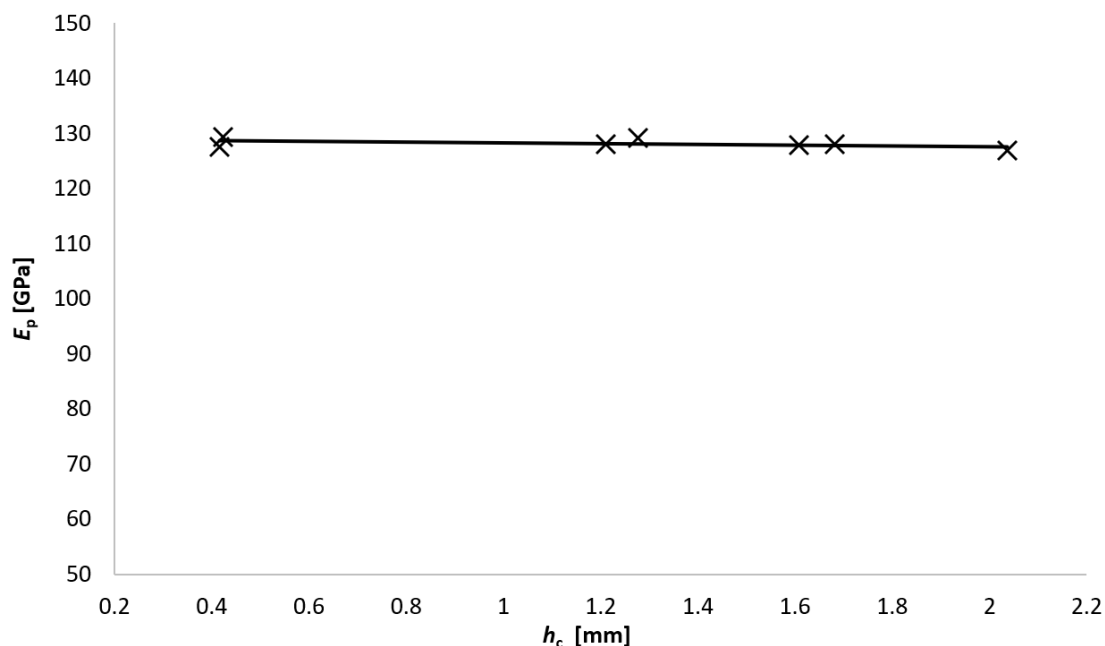
Obr. 26 –Youngův modul pružnosti se zahrnutím vlivu porozity

5.4.4 Směšovací pravidlo se zahrnutím nelineárního vlivu porozity

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.4, dle rovnic (21) a (18) můžeme vypočítat porozitu a modul pružnosti nanesené vrstvy. Pro E_c byly použity hodnoty kompozitního systému substrátu s povlakem naměřené pomocí IEM (viz tab. 6), E_s je průměrná hodnota modulu pružnosti hliníkového substrátu, E_0 je tabulková hodnota modulu pružnosti čisté mědi (130 GPa) a V_s a V_p jsou objemové podíly substrátu a porézní vrstvy. Výsledné hodnoty Youngova modulu E_p dle tohoto modelu jsou uvedeny v tab. 11, graficky v podobě závislosti modulu pružnosti na tloušťce povlaku v obr. 27.

Tabulka 11: Youngův modul pružnosti zkušebních těles dle směšovacího pravidla se zahrnutím nelineárního vlivu porozity.

Č. vzorku	B3	D1	E1	F2	G1	H1	I1
E_p [GPa]	127.6	128	127.9	127	129.4	129.2	128.1



Obr. 27 – Youngův modul pružnosti se zahrnutím nelineárního vlivu porozity

Vypočtené hodnoty modulu pružnosti byly opět proloženy lineární funkcí ve tvaru

$$E_p = -0,69 h_c + 129. \quad (43)$$

5.4.5 Pautrotův model

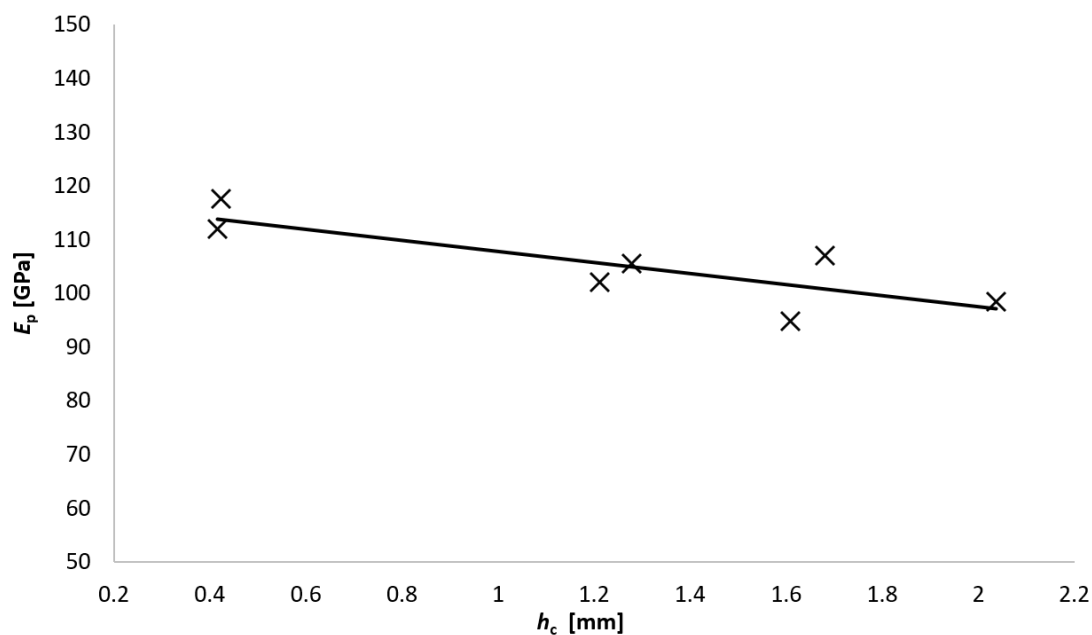
Hodnoty Youngova modulu pružnosti (E_p), vypočtené dle Pautrotova modelu pomocí rovnice (34), jsou uvedeny v tab. 12 spolu se střední hodnotou a směrodatnou odchylkou každé skupiny vzorků. K tomu bylo nutné pro všechna zkušební tělesa předem vypočítat příslušné poměry jednotlivých veličin dle rovnice (33), uvedené v teoretické části. Pro rezonanční frekvenci substrátu ($f_s = 5721,67$ Hz) byla použita průměrná hodnota frekvencí tří vzorků bez povlaku, za celkové rezonanční frekvence f_t byly dosazeny naměřené rezonanční frekvence f_{RF} . Pro výpočet poměru hustot byla jako hustota povlaku ρ_c použita hodnota typická pro hustotu měděných Cold Spray nástřiků ($\rho_c = 8,81$ g/cm³) dle [29]. Jako hustota substrátu ρ_s byla vzata hodnota $\rho_s = 2,65$ g/cm³, uvedená v [30] pro použitou hliníkovou slitinu EN AW-5083 H111. Hodnoty tloušťek substrátu h_s a povlaku h_c jsou uvedeny v tab. 5.

Tabulka 12: Youngův modul pružnosti povlaku vypočtený pomocí Pautrotova modelu

Č. Vzorku	B1	B2	B3	D1	D2	D3
E_p [GPa]	115,0	111,9	108,9	99,8	103,6	102,9
$E_{p, stř \pm s}$ [GPa]	111,9 \pm 2,5			102,1 \pm 1,7		
Č. Vzorku	E1	E2	E3	F1	F2	F3
E_p [GPa]	95,8	94,7	93,7	99,6	98,0	97,7
$E_{p, stř \pm s}$ [GPa]	94,7 \pm 0,8			98,4 \pm 0,8		
Č. Vzorku	G1	G2	G3	H1	H2	H3
E_p [GPa]	120,9	113,7	117,9	106,0	105,9	104,4
$E_{p, stř \pm s}$ [GPa]	117,5 \pm 3,0			105,4 \pm 0,7		
Č. Vzorku	I1	I2	I3			
E_p [GPa]	106,9	106,5	107,8			
$E_{p, stř \pm s}$ [GPa]	107,5 \pm 0,5					

Výsledné hodnoty modulu pružnosti byly pro zachování jednotnosti napříč všemi kompozitními modely proloženy lineární funkcí ve tvaru (obr. 28)

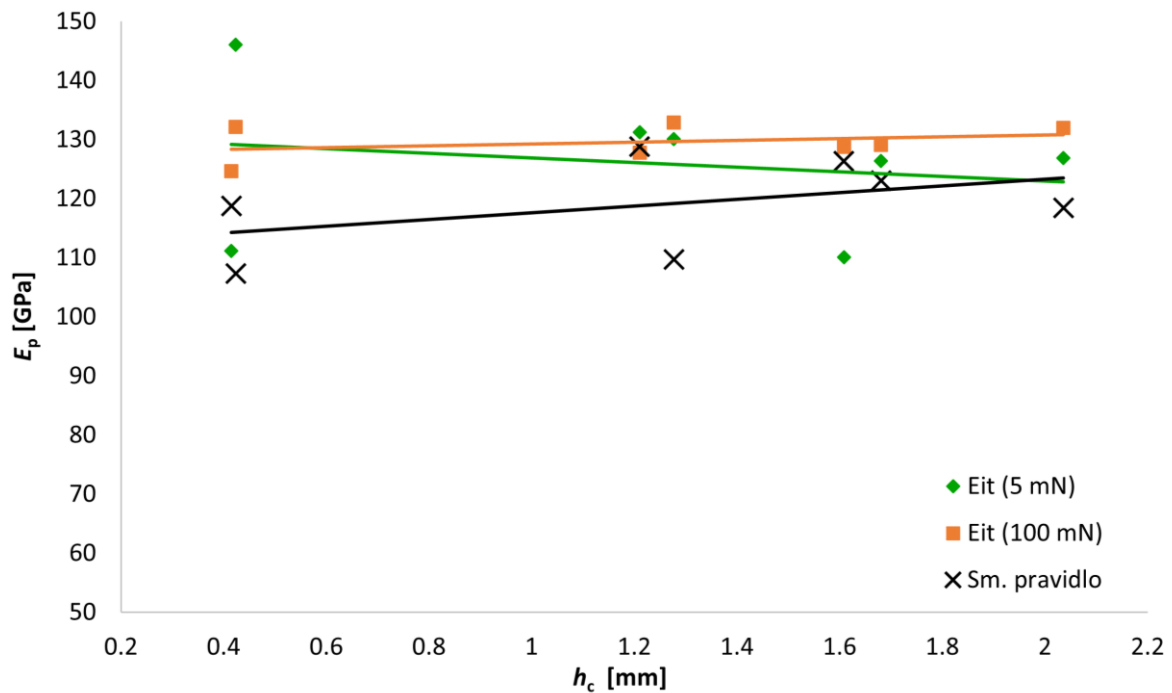
$$E_p = -10,4 h_c + 118,1. \quad (44)$$



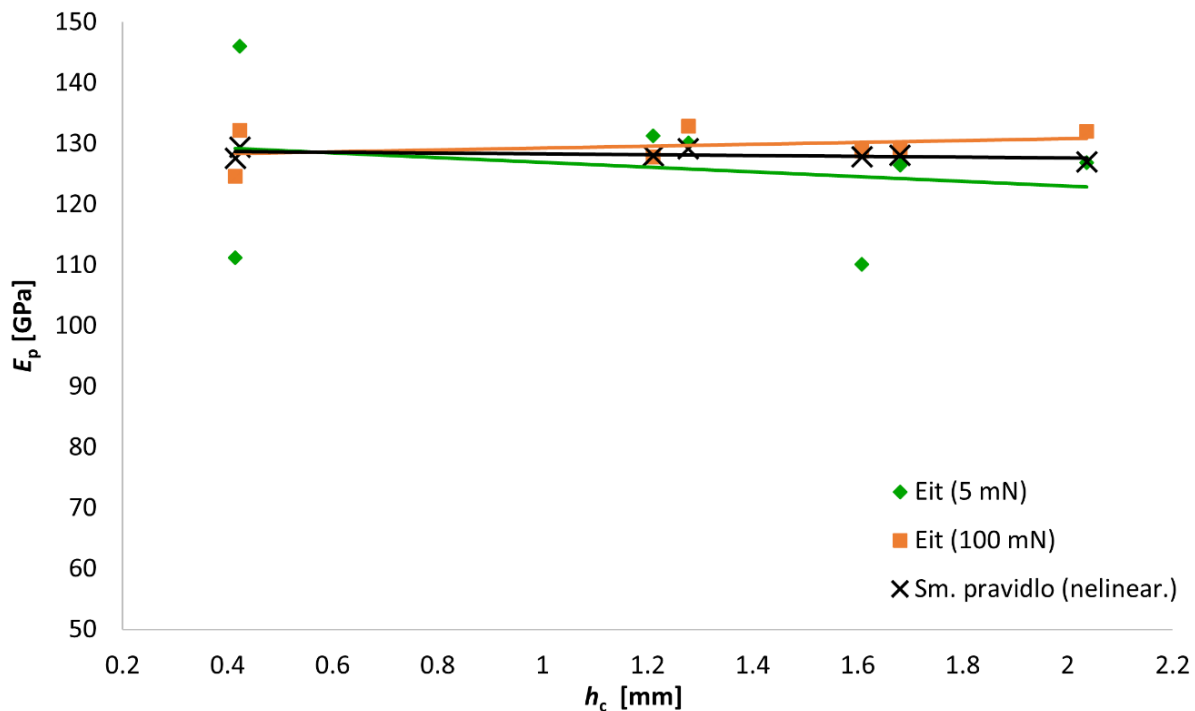
Obr. 28 – Graf závislosti Youngova modulu pružnosti povlaku na jeho tloušťce – Pautrotův model

5.4.6 Porovnání použitých modelů

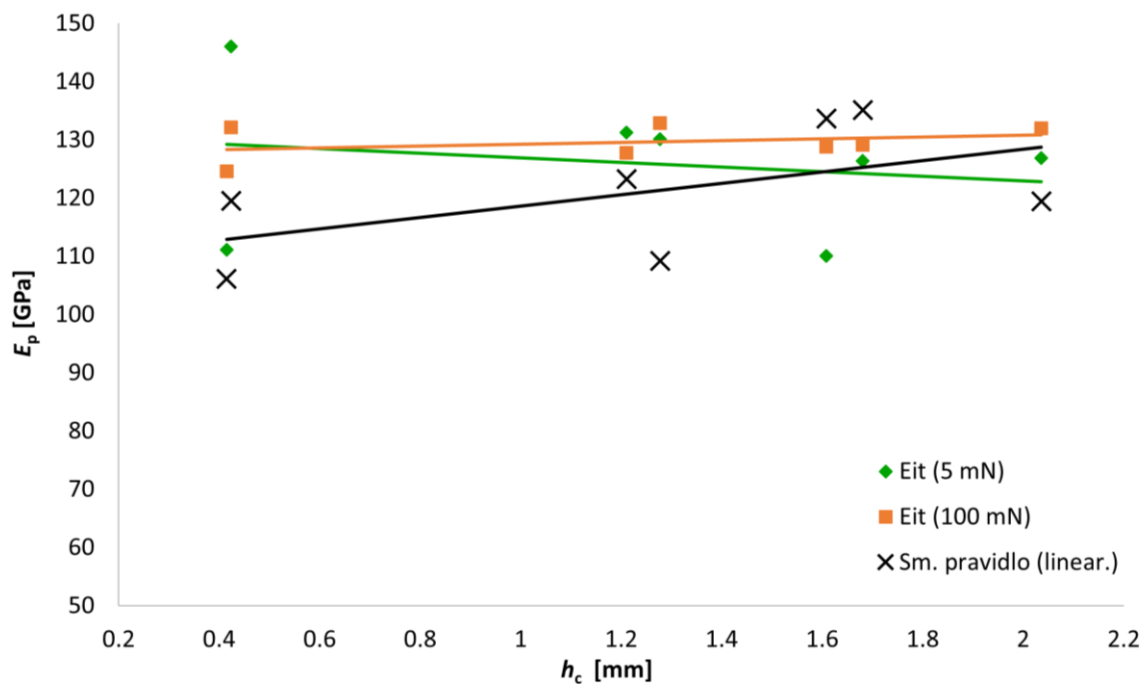
Výsledky získané prostřednictvím jednotlivých modelů, představených v kapitole 5.4, jsou shrnuty v grafech na obr. 29 až obr. 32. Pro přehledné srovnání jednotlivých modelů byl každý z nich vykreslen spolu s výsledky nanoindentačních zkoušek. Vykreslené hodnoty modulů pružnosti v tahu E_p v každém grafu představují střední hodnoty získané pomocí těchto modelů pro jednotlivé skupiny těles.



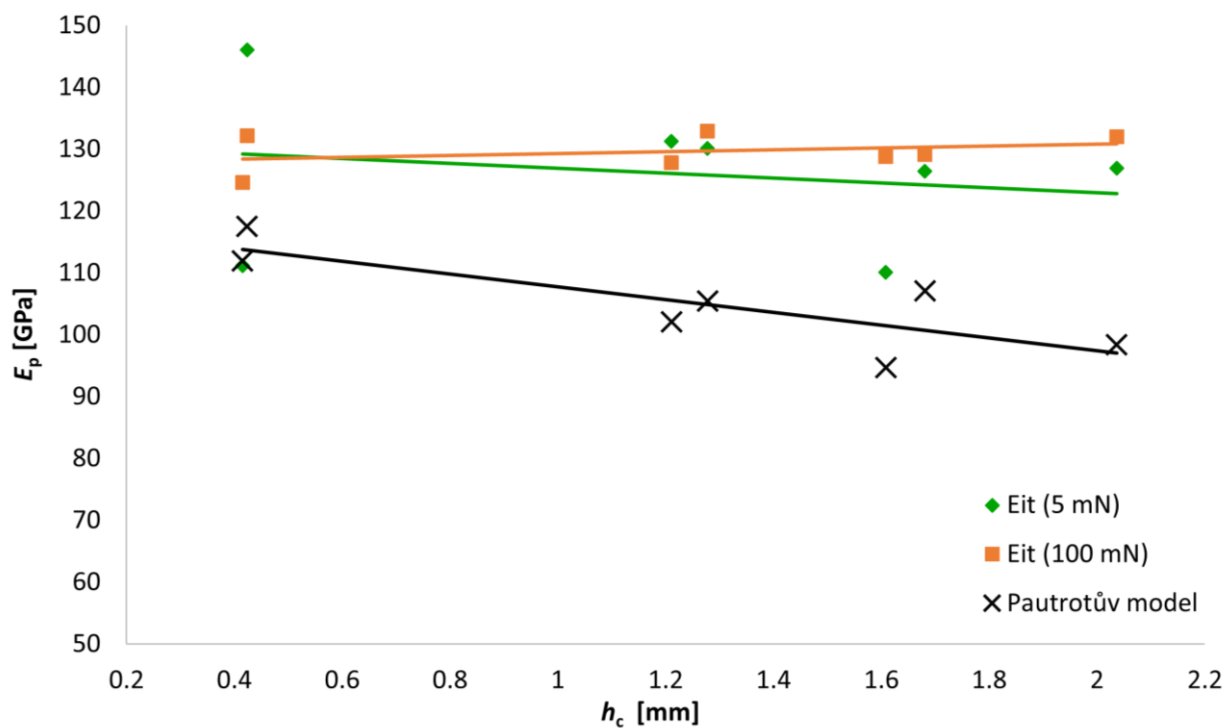
Obr. 29 – Srovnání modelu založeného na směšovacím pravidle s výsledky nanoindentačních zkoušek



Obr. 30 – Srovnání modelu založeného na směšovacím pravidle se zahrnutím nelineárního vlivu porozity s výsledky nanoindentačních zkoušek



Obr. 31 – Srovnání modelu založeného na směšovacím pravidle se zahrnutím vlivu porozity s výsledky nanoindentačních zkoušek



Obr. 32 – Srovnání Pautrotova modelu s výsledky nanoindentačních zkoušek

6 Diskuse

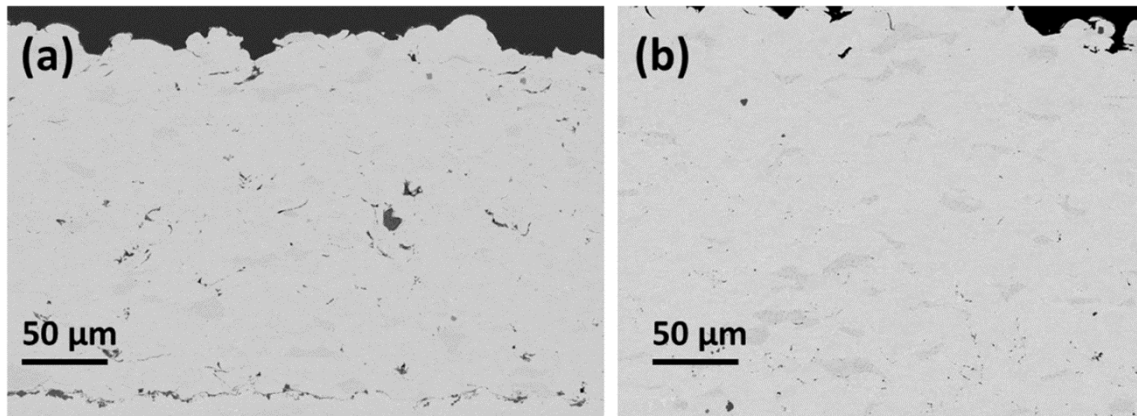
Z výsledků měření Youngova modulu pružnosti E a rezonančních frekvencí f_{RF} pomocí IEM (viz tab. 6) je patrná rostoucí hodnota těchto charakteristik s tloušťkou nanoseného povlaku. To je způsobeno volbou systému substrát-povlak a souvisí s vlastnostmi každého ze zúčastněných materiálů. Materiály vykazující vyšší rezonanční frekvence mají rovněž vyšší Youngovy moduly pružnosti. K tomu se váže nižší vnitřní tření a tím i nižší koeficient tlumení daného materiálu popsany rovnicí (1) [31]. To dle publikací [32] a [33] platí i pro systém navržený v této práci. Výjimkou z tohoto pravidla jsou porézní materiály. Porézní materiály disponují vyššími koeficienty vnitřního tlumení, ale naopak mají nižší Youngovy moduly pružnosti, protože póry nepřenášejí zatížení [31].

Modul pružnosti v tahu kompaktní čisté mědi (anglicky „bulk material“) je dle literatury [22] roven 130 GPa. V závislosti na zpracování mědi, a tedy i v závislosti na metodě použité ke zhotovení povlaku jsou zjišťovány menší či větší odchylky od uvedené hodnoty [34]. Ke zjištění přesné hodnoty Youngova modulu pružnosti povlaku byla proto provedena série nanoindentačních zkoušek. Při velikosti zatížení 100 mN byla naměřena průměrná hodnota povlaku 129,6 GPa, kdežto při zatížení 5 mN byla tato hodnota 126,0 GPa. Snížení průměrné hodnoty doprovázela i vyšší směrodatná odchylka. Tato skutečnost může být způsobena především menší měřenou oblastí a větší náchylností měření na okolní vlivy, kdy k nepřesnostem dochází například v případech, je-li indentace provedena na hranicích splatek či pórů. Výsledky z nanoindentační zkoušky uvedené v tab. 7 byly následně použity jako referenční hodnoty pro porovnání jednotlivých výpočetních modelů, diskutovaných v této práci.

Jak bylo zmíněno výše, porozita nanosené vrstvy může mít výrazný vliv na rezonanční frekvence. Se zvyšující se úrovní porozity klesá rezonanční frekvence a tím i Youngův modul pružnosti. Směšovací pravidlo tento faktor nebere v úvahu, což lze doložit výsledky, uvedenými na obr. 29. Průměrné hodnoty modulu pružnosti vykazují, bez ohledu na tloušťku povlaku, poměrně výrazný rozptyl a stejně tak odchylku od středních hodnot modulu pružnosti, naměřeného indentační metodou. Proto byly do úvah zahrnuty dva modely, vycházející ze směšovacího pravidla, které vliv porozity berou v úvahu.

Střední hodnoty modulů pružnosti povlaku získaných dle směšovacího pravidla a modelu založeném na lineárním vlivu porozity jsou 121,0 GPa, resp. 120,9 GPa. K odchylkám těchto dvou modelů od nanoindentačních hodnot modulu pružnosti dochází převážně v oblasti malých tlouštěk. Ty mohou být zapříčiněny např. nedostatečnou přesností měření takto malých tlouštěk povlaků (viz tab. 5). Naopak nelineární model uvedený na obr. 30 poskytuje velmi dobré výsledky. Všechny hodnoty modulu pružnosti získané tímto modelem korelují s hodnotami naměřenými pomocí nanoindentační zkoušky a v celém rozsahu tlouštěk povlaků vykazují poměrně nízkou úroveň rozptylu. Z grafu na obr. 30 je rovněž patrný další důležitý výsledek, a to praktická nezávislost hodnot modulu pružnosti na tloušťce povlaku. Youngův modul pružnosti je elastická charakteristika závislá na vazbách mezi atomy, respektive potenciální energii mezi nimi. [35] Z tohoto důvodu není možné, aby modul pružnosti kompaktního materiálu bez větších strukturních poruch, jako je například porozita, byl ovlivněn deformačním

zpevněním vlivem zvětšující se tloušťky povlaku. Při zkoumání Cold Spray nástřiků z materiálu Inconel 718 autoři práce [36] došli k opačnému závěru. Modul pružnosti tohoto povlaku stoupal z hodnoty 123 GPa až na hodnotu 197 GPa při tloušťkách povlaku od 216 μm do 1173 μm . Jelikož ale nominální hodnota modulu pružnosti kompaktního materiálu Inconel 718 činí 200 GPa, je pravděpodobné, že zvolené parametry CS nebo tloušťky povlaku nebyly dostačující pro vytvoření uniformní vrstvy bez defektů. Toto tvrzení lze podložit tím, že nejtlustší nanosená vrstva na obr. 33b s hodnotou modulu pružnosti 197 GPa dosahuje téměř nominální hodnoty modulu pružnosti pro tento materiál a vykazuje na pohled mnohem menší úroveň porozity než nejtenčí nanosená vrstva na obr. 33a.



Obr. 33 – SEM snímek povlaku z materiálu Inconel 718 zhotoveného pomocí CS s tloušťkami (a) 216 μm , (b) 1173 μm , převzato z [36]

Pautrotův model se ukázal jako zcela nevhodný pro měření elastických charakteristik povlaků s tloušťkami vrstev většími jak desítky mikrometrů. Z obr. 32 je patrné, že se zvyšující se tloušťkou povlaku Youngův modul pružnosti výrazně klesá pod úroveň hodnot naměřených pomocí nanoindentace. Výsledky měření celkového modulu pružnosti zkušebních těles (viz tab. 6) vykazují rostoucí trend se zvyšující se tloušťkou povlaku. Není tedy možné, aby modul pružnosti povlaku klesal. Práce [17], zabývající se měřením tenkých vrstev pomocí Pautrotova modelu ukázala, že tento model je silně závislý na poměru tlouštěk povlaku a substrátu, kdy se zvyšující se tloušťkou povlaku roste jeho nepřesnost.

Průměrná hodnota modulu pružnosti naměřená pomocí nanoindentační zkoušky se zatížením 5 mN, resp. 100 mN je 126,0 GPa, resp. 129,6 GPa. Při porovnání všech analyzovaných modelů pro výpočet modulu pružnosti povlaku dosáhl největší přesnosti model založený na směšovacím pravidle se zahrnutím nelineárního vlivu porozity. Střední hodnota modulu pružnosti vypočtená ze všech sad zkušebních těles činí 128,2 GPa.

Součástí experimentální části práce bylo rovněž sejmutí části povlaku s největší tloušťkou ze substrátu (tl. cca 2 mm), na kterém byla následně provedena impulzní excitační zkouška s cílem porovnat hodnotu modulu pružnosti vrstvy s prezentovanými modely, resp. tabulkovými hodnotami. Na základě značné odchylky naměřeného modulu pružnosti od hodnot modulu pružnosti získaných pomocí nanoindentace se ukázalo, že takový experiment je nevhodný pro posouzení platnosti výpočetních modelů. Odchylku od nanoindentačních hodnot modulu pružnosti v našem případě s největší pravděpodobností způsobila praktická nemožnost dodržet

předepsané rozměry zkušebního tělesa z důvodu malé tloušťky odděleného povlaku (1,97 mm). Norma ASTM E 1876-22 [1] stanovuje přesnost jednotlivých rozměrů zkušebního tělesa a rovněž pojednává o dopadu na modul pružnosti při jejich nedodržení. Tento vliv je dle normy významný především při tloušťkách zkušebních těles menších jak 3 mm. Norma [1] také uvádí, že povrch celého zkušebního tělesa má být hladký, což v případě Cold Spray vrstev není na povrchu nanesené vrstvy splněno.

Návrhem pro další výzkum a studium by mohlo být ověření platnosti tohoto modelu na více kombinacích materiálu substrátu a povlaku pro různé úrovně porozity. V důsledku rozestupu při jednotlivých průchodech CS zařízení dochází ke vzniku nerovností na povrchu, které se projevují pruhy s větší tloušťkou povlaku. Za zmínku tedy stojí zhotovení zkušebních těles, jejichž povrch by byl zbroušený tak, aby byla tloušťka povlaku po celé délce tělesa uniformní a nedocházelo tak k nepřesnostem při výpočtech modulu pružnosti.

7 Závěr

Práce byla zaměřena na určování modulu pružnosti porézních vrstev pomocí impulzní excitační metody. V teoretické části byly popsány základní termíny a postupy impulzní excitační zkoušky a nanoindentace. V rámci experimentální části byl vysvětlen průběh přípravy 27 zkušebních těles, z nichž 24 mělo povlak nanosený pomocí technologie Cold Spray s tloušťkami v rozmezí od 0,4 mm do 2 mm (systém Cu/ EN AW-5083 H111). Pomocí impulzní excitační metody byly určeny rezonanční frekvence a moduly pružnosti příslušných zkušebních těles. K posouzení úrovně porozity byly zhotoveny metalografické výbrusy, na kterých byla provedena obrazová analýza.

S využitím naměřených hodnot byly poté vypočteny moduly pružnosti povlaků pomocí čtyř kompozitních modelů – směšovacího pravidla, směšovacího pravidla se zahrnutím lineární porozity, směšovacího pravidla se zahrnutím nelineární porozity a Pautrova modelu. Aby bylo možné objektivně posoudit platnost zmíněných modelů, byla pro zjištění skutečné hodnoty modulu pružnosti povlaků využita nanoindentační zkouška s dvěma různými aplikovanými zatíženími, a to 5 mN a 100 mN. Výsledné hodnoty modulů pružnosti získané pomocí kompozitních modelů byly na závěr porovnány s výsledky nanoindentačních zkoušek. Bylo tak možné vybrat model, jehož výsledky vykazují nejlepší shodu s experimentálně určenými hodnotami modulu pružnosti v tahu.

Na základě těchto výsledků bylo zjištěno, že nejlépe odpovídajícím modelem je model založený na směšovacím pravidle se zahrnutím nelineárního vlivu porozity. Pomocí tohoto modelu byla získána střední hodnota modulu pružnosti povlaku E_p , která činila 128,2 GPa, což je nejbližší střední hodnotě indentačního modulu pružnosti při zatížení 100 mN (129,6 GPa). Prokázáno bylo také, že hodnota modulu pružnosti povlaků, vypočtená podle zmíněného modelu je nezávislá na jejich tloušťce. To je v souladu jak s výsledky nanoindentačních zkoušek, tak literárními prameny zmíněnými v diskusi. [35]

8 Literatura

- [1] ASTM E1876-22 - *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration* [online]. 2022.
- [2] ROEBBEN, G., B. BOLLEN, A. BREBELS, J. VAN HUMBEECK and O. VAN DER BIEST. *Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. Review of Scientific Instruments* [online]. 1997, **68**(12), 4511–4515. ISSN 00346748. Dostupné z: doi:10.1063/1.1148422
- [3] DANIEL VALÁŠEK. *Stanovení mechanických charakteristik povlaků impulsní excitační metodou* [online]. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132924>
- [4] POPOV, I. I. and M. V. SHITIKOVA. *Impulse excitation technique and its application for identification of material damping: An overview*. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. B.m.: IOP Publishing Ltd, 2020. ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/962/2/022025
- [5] FISCHER-CRIPPS, Anthony. *Nanoindentation, Mechanical Engineering Series* [online]. 2013. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-9872-9>
- [6] WINER, Ward O, Arthur E BERGLES, Georgia A KLUTKE, Kuo K WANG, Iain FINNIE, J R WELTY, Michael D BRYANT, Henry T YANG, Van C MOW, Frederick A LECKIE and Dietmar GROSS. *Mechanical Engineering Series Series Editors* [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.springer.com/series/1161>
- [7] BHUSHAN, Bharat. *Depth-sensing nanoindentation measurement techniques and applications* [online]. B.m.: Springer Verlag. 1. květen 2017. ISSN 09467076. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-017-3372-2
- [8] HARDIMAN, M., T. J. VAUGHAN and C. T. MCCARTHY. *The effects of pile-up, viscoelasticity and hydrostatic stress on polymer matrix nanoindentation. Polymer Testing* [online]. 2016, **52**, 157–166. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2016.04.003
- [9] OTANI, Lucas et al. *Determination of composites elastic moduli using the Impulse Excitation Technique* [online]. 2022. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.34302.66886
- [10] VILLAFUERTE, Julio. *Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications* [online]. B.m.: Springer International Publishing, 2015. ISBN 9783319167725. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-16772-5

- [11] STANISLAV ŠESTÁK. *Depozice kompozitních povlaků typu MMC na ocelové substráty metodou Cold Spray* [online]. Brno, 2023. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/150145>
- [12] OGAWA, K., K. ITO, K. ICHIMURA, Y. ICHIKAWA, S. OHNO and N. ONDA. *Characterization of low-pressure cold-sprayed aluminum coatings*. In: *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2008, s. 728–735. ISSN 10599630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-008-9254-5
- [13] VIGNOLI, Lucas L., Marcelo A. SAVI, Pedro M.C.L. PACHECO and Alexander L. KALAMKAROV. *Comparative analysis of micromechanical models for the elastic composite laminae*. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **174**. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.106961
- [14] TAYA, Minoru. *Strengthening Mechanisms of Metal Matrix Composites*. *Material Transactions* [online]. 1991, **32**(1). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2320/matertrans1989.32.1>
- [15] JANA, Prasanta, Sumit RAY, Diya GOLDAR, Navya KOTA, Sujoy Kumar KAR and Siddhartha ROY. *Study of the elastic properties of porous copper fabricated via the lost carbonate sintering process*. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2022, **836**. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2022.142713
- [16] KOVÁČIK, J. *Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials*. *Journal of Materials Science Letters* [online]. 1999, **18**(13). ISSN 02618028. Dostupné z: doi:10.1023/A:1006669914946
- [17] ZGHEIB, Elia, Akram ALHUSSEIN, Mohamed FARES SLIM, Khaled KHALIL and Manuel FRANÇOIS. *Multilayered models for determining the Young's modulus of thin films by means of Impulse Excitation Technique*. *Mechanics of Materials* [online]. 2019, **137**. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmat.2019.103143i
- [18] SLIM, M. F., A. ALHUSSEIN, A. BILLARD, F. SANCHETTE a M. FRANÇOIS. *On the determination of Young's modulus of thin films with impulse excitation technique*. *Journal of Materials Research* [online]. 2017, **32**(3). ISSN 20445326. Dostupné z: doi:10.1557/jmr.2016.442
- [19] SAFINA A.S. *Materiálový list pro 99,5% Cu prášek* [online]. [cit. 2024-05-26]. Dostupné z: <https://www.safina.cz/wp-content/uploads/2022/02/datasheet-powder-cu-9995-4515-micr.pdf>
- [20] *IMPACT COLD SPRAY SYSTEM 5/11* [online]. [cit. 2024-05-26]. Dostupné z: <https://www.fst.nl/thermal-spray-equipment/modular-thermal-spray-systems/cold-gas-spray-systems/impact-cold-spray-system-5-11.html?i=impact-cold-spray-system-511-2>

- [21] ČSN EN ISO 14577-4: *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 4: Zkušební metoda pro kovové a nekovové povlaky* [online]. 2017.
- [22] *Material Property Database: Copper* [online]. [cit. 2024-05-26].
Dostupné z: <https://www.mit.edu/~6.777/matprops/copper.htm>
- [23] POZA, Pedro and Miguel Ángel GARRIDO-MANEIRO. *Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and wear behaviour. Progress in Materials Science* [online]. 2022, **123**. ISSN 00796425.
Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2021.100839
- [24] SCHMITT, J., J. FIEBIG, S. SCHRÜFER, O. GUILLON and R. VASSEN. *Adjusting Residual Stresses During Cold Spray Deposition of IN718. Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2024, **33**(1), 210–220. ISSN 15441016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-023-01673-4
- [25] ČSN EN ISO 6892-1: *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Česká agentura pro standardizaci. 2021.
- [26] DIN 50125. *Testing of metallic materials - Tensile test pieces*. Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN). 2016.
- [27] IHSANI, Zadid. *Porosity Analysis Procedure* [online]. [cit. 2024-05-26]. Dostupné z: https://www.academia.edu/24152953/Porosity_Analysis_Procedure_with_ImageJ
- [28] MORIDI, A., S. M. HASSANI GANGARAJ, S. VEZZU and M. GUAGLIANO. *Number of passes and thickness effect on mechanical characteristics of cold spray coating. In: Procedia Engineering* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2014, s. 449–459. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2014.06.296
- [29] LUZIN, V., K. SPENCER and M. X. ZHANG. *Residual stress and thermo-mechanical properties of cold spray metal coatings. Acta Materialia* [online]. 2011, **59**(3), 1259–1270. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2010.10.058
- [30] *Aluminium Alloys – Aluminium 5083 Properties, Fabrication and Applications*. [online]. [cit. 2024-05-26]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>
- [31] TAKAHASHI, Tetsu, Koji MATSUMARU and Kozo ISHIZAKI. *High Young's Modulus With High Damping Capacity of Porous Alumina* [online]. 2010. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5545>
- [32] IRVINE, Tom. *Damping cross-reference* [online]. [cit. 2024-05-26]. 1999. Dostupné z: http://www.vibrationdata.com/tutorials_alt/dcross.pdf

- [33] MASSARA, Nazareno, Enrico BOCCALERI, Marco MILANESIO and Mattia LOPRESTI. *IETeasy: An open source and low-cost instrument for impulse excitation technique, applied to materials classification by acoustical and mechanical properties assessment*. *HardwareX* [online]. 2021, **10**. ISSN 24680672. Dostupné z: doi:10.1016/j.ohx.2021.e00231
- [34] DOS SANTOS, Erick Araújo and Gustavo P. REHDER. *Study of the young's modulus in microstructures through the resonance frequency technique for applications in commercial CMOS processes*. In: *Materials Research* [online]. B.m.: Universidade Federal de Sao Carlos, 2017, s. 81–84. ISSN 15161439. Dostupné z: doi:10.1590/1980-5373-MR-2017-0439
- [35] PADMAVATHI, Devarakonda Annapurna. *Potential Energy Curves & Material Properties*. *Materials Sciences and Applications* [online]. 2011, **02**(02), 97–104. ISSN 2153-117X. Dostupné z: doi:10.4236/msa.2011.22013
- [36] SINGH, R., S. SCHRUEFER, S. WILSON, J. GIBMEIER and R. VASSEN. *Influence of coating thickness on residual stress and adhesion-strength of cold-sprayed Inconel 718 coatings*. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2018, **350**, 64–73. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2018.06.080

9 Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky

IEM – impulzní excitační metoda

CS – Cold Spray

FFT – rychlá Fourierova transformace (fast Fourier transform)

DE – depoziční efektivita

RVE – Reprezentativní objemový prvek (representative volume element)

RFDA – analyzátor rezonančních frekvencí a tlumení (resonant frequency damping analyzer)

Symboly

Q^{-1} – koeficient tlumení

k – ztrátový součinitel

δ – logaritmický dekrement útlumu

E – Youngův modul pružnosti

f_{RF} – rezonanční frekvence

L – délka zkušebního tělesa

b – šířka zkušebního tělesa

t – tloušťka zkušebního tělesa

T_1 – korekční faktor

G – modul pružnosti ve smyku

f_t – rezonační frekvence v torzním módu

A – korekční faktor

B – geometrický faktor

μ – Poissonův poměr

f_f – rezonační frekvence v ohybovém módu

S – indentační tuhost

h_p – indentační hloubka plastické části

h_f – finální indentační hloubka

h_c – kontaktní indentační hloubka

h_{max} – maximální indentační hloubka

h_d – velikost snížení materiálu pod h_{max}

W_{max} – maximální zatěžovací síla

ε – konstanta vstažená ke geometrii indentoru
 A – plocha vtisku
 H_i – Berkovichova indentační tvrdost
 E_i – indentační Youngův modul pružnosti
 V_c – kritická rychlost
 DE, η – depoziční efektivita
 m_{sp} – hmotnost substrátu s nástřikem
 m_s – hmotnost substrátu
 m_p – hmotnost prášku použitého pro depozici
 E_{c1} – modul pružnosti kompozitu zatíženého ve směru vystužující složky
 E_{c2} – modul pružnosti kompozitu zatíženého kolmo na směr vystužující složky
 V_f – objemový podíl vystužující složky
 V_s – objemový podíl substrátu
 E_f – modul pružnosti vystužující složky
 E_s – modul pružnosti substrátu
 σ_c – napětí působící na kompozitní systém
 σ_s – napětí působící na substrát
 σ_f – napětí působící na vystužující složku
 ε – poměrná deformace
 E_p – modul pružnosti porézního materiálu
 E_0 – modul pružnosti čistého materiálu bez porozity
 p – porozita
 p_c – kritická porozita
 n – geometrický faktor
 E_{por} – modul pružnosti pórů
 V_{por} – objemový podíl pórů
 E_m – modul pružnosti porézní vrstvy
 f_n – rezonační frekvence n-tého vibračního módu
 X_n – konstanta obsahující okrajové podmínky tělesa
 I – kvadratický moment průřezu
 ρ – hustota
 S – plocha
 R_f – poměr rezonačních frekvencí kompozitu a substrátu

R_E – poměr modulů pružnosti povlaku a substrátu

R_h – poměr tloušťek povlaku a substrátu

R_p – poměr hustot povlaku a substrátu

$R_{p0,2}$ – smluvní mez kluzu

R_m – mez kluzu

A_g – homogenní tažnost

A – tažnost

m – váha

h_c – tloušťka povlaku

h_s – tloušťka substrátu

E_{it} – indentační modul pružnosti

$E_{f, stř+s}$ – střední hodnota modulu pružnosti se směrodatnou odchylkou

s – směrodatná odchylka

10 Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků:

- Obr. 1 – Schéma ohybového módu, upraveno z [1]
- Obr. 2 – Schéma torzního módu, upraveno z [1]
- Obr. 3 – Schéma iterativního výpočtu Poissonova poměru, upraveno z [1]
- Obr. 4 – Schématické znázornění (a) Berkovichova a (b) Knoopova indentoru používaných pro nanoindentační zkoušky, upraveno z [5]
- Obr. 5 – Schéma pile-upu (vlevo) a sink-inu (vpravo). (a) pohled v řezu vtisku, (b) pohled shora, převzato z [8]
- Obr. 6 – Schéma zatěžovací křivky při nanoindentaci, upraveno z [5]
- Obr. 7 – Morfologie povrchu v okolí indentoru při maximálním zatížení, převzato z [9]
- Obr. 8 – Dělení kompozitních materiálů, upraveno z [9]
- Obr. 9 – Schéma procesu Cold Spray, upraveno z [10]
- Obr. 10 – Výhody Cold Spray nástřiků, převzato z [10]
- Obr. 11 – Schéma tvorby povlaku technologií Cold Spray, upraveno z [10]
- Obr. 12 – Graf vlivu rychlosti částic na depoziční efektivitu, upraveno z [10]
- Obr. 13 – Reprezentativní objemový prvek kompozitního systému, převzato z [14]
- Obr. 14 – Znázornění posuvu neutrální osy vlivem povlaku, upraveno z [18]
- Obr. 15 – Zařízení Impact Innovations Cold Spray system 5/11, převzato z [20]
- Obr. 16 – Boční pohled na zkušební tělesa
- Obr. 17 – Měřicí sestava pro IEM
- Obr. 18 – Metalografické výbrusy pro nanoindentační zkoušku
- Obr. 19 – Nanoindentor CSM TTX NHT2
- Obr. 20 – Závislost Youngova modulu na tloušťce povlaku
- Obr. 21 – Závislost rezonanční frekvence na tloušťce povlaku
- Obr. 22 – Závislost indentačních modulů pružnosti na tloušťce povlaku
- Obr. 23 – Graf závislosti Youngova modulu pružnosti povlaku na jeho tloušťce – směšovací pravidlo
- Obr. 24 – Rozhraní softwaru ImageJ při nastavení hranice prahování snímku ze světelného mikroskopu
- Obr. 25 – Nastavení rozsahu velikostí póru zahrnutých v analýze
- Obr. 26 – Youngův modul pružnosti se zahrnutím vlivu porozity
- Obr. 27 – Youngův modul pružnosti se zahrnutím nelineárního vlivu porozity

Obr. 28 – Graf závislosti Youngova modulu pružnosti povlaku na jeho tloušťce – Pautrotův model

Obr. 29 – Srovnání modelu založeného na směšovacím pravidle s výsledky nanoindentačních zkoušek

Obr. 30 – Srovnání modelu založeného na směšovacím pravidle se zahrnutím nelineárního vlivu porozity s výsledky nanoindentačních zkoušek

Obr. 31 – Srovnání modelu založeného na směšovacím pravidle se zahrnutím vlivu porozity s výsledky nanoindentačních zkoušek

Obr. 32 – Srovnání Pautrotova modelu s výsledky nanoindentačních zkoušek

Obr. 33 – SEM snímek povlaku z materiálu Inconel 718 zhotoveného pomocí CS s tloušťkami (a) 216 μm , (b) 1173 μm , převzato z [36]

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Typy symetrií a jejich příslušné moduly pružnosti, upraveno z [9]

Tabulka 2: Přibližné tloušťky vrstev jednotlivých skupin vzorků

Tabulka 3: Materiálové charakteristiky slitiny EN AW-5083 H111, převzato z [3]

Tabulka 4: Rozměry a hmotnosti zkušebních těles

Tabulka 5: Tloušťky povlaku a substrátu

Tabulka 6: Hodnoty rezonančních frekvencí (f_{RF}), vnitřního tlumení (Q^{-1}) a modulů pružnosti (E) vzorků (systém substrát + povlak)

Tabulka 7: Indentační Youngův modul pružnosti vzorků při zatíženích 5 mN a 100 mN

Tabulka 8: Youngovy moduly pružnosti měděných povlaků spolu se střední hodnotou a směrodatnou odchylkou – směšovací pravidlo

Tabulka 9: Hodnoty porozity vybraných vzorků

Tabulka 10: Hodnoty Youngova modulu pružnosti se zahrnutím vlivu porozity

Tabulka 11: Youngův modul pružnosti zkušebních těles dle směšovacího pravidla se zahrnutím nelineárního vlivu porozity.

Tabulka 12: Youngův modul pružnosti povlaku vypočtený pomocí Pautrotova modelu